



# **UNIVERSIDAD DE OVIEDO**

DEPARTAMENTO DE EXPLOTACIÓN Y PROSPECCIÓN DE MINAS

MÁSTER INTERUNIVERSITARIO EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## **ANÁLISIS Y DISEÑO DE MÁQUINA DE ENSAYO DE DISCOS DE CORTE MEDIANTE METODOLOGÍA DE HURST**

**AUTOR: D<sup>a</sup>. CARMEN COVADONGA GARCÍA FERNÁNDEZ**

**DIRECTOR: D. JOSÉ MANUEL MESA FERNÁNDEZ**

**CODIRECTOR: D. CELESTINO GONZÁLEZ NICIEZA**

**JULIO 2013**

# Índice General

---

## MEMORIA

- 1- INTRODUCCIÓN
- 2- FUNDAMENTO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER
- 3- PROCEDIMIENTO DE DISEÑO
- 4- APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO
- 5- RESULTADOS
- 6- CONCLUSIONES
- 7- LÍNEAS FUTURAS
- 8- BIBLIOGRAFÍA

## ANEXOS

- ANEXO I: LISTADO DE BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN
- ANEXO II: BOCETOS INICIALES DE DESARROLLO DEL DISPOSITIVO
- ANEXO III: RESULTADOS NUMÉRICOS DE MODELIZACIÓN
- ANEXO IV: PLANOS DEL EQUIPO DE ENSAYO
- ANEXO V: PATENTE DE INVENCION DEL DISPOSITIVO

# **MEMORIA**

---

# Índice

---

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Objetivo</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Estructura de la documentación</b>	<b>2</b>
<b>2 FUNDAMENTO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER</b>	<b>5</b>
<b>3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Búsqueda de Información</b>	<b>6</b>
3.1.1 Desarrollo de la Búsqueda de Información	7
3.1.2 Herramientas de Búsqueda de Información	9
<b>3.2 Especificaciones del Producto</b>	<b>13</b>
3.2.1 Herramientas para la elaboración de las Especificaciones	14
<b>3.3 Generación de Conceptos</b>	<b>24</b>
3.3.1 Metodología de Generación de Conceptos	24
3.3.2 Herramientas y Técnicas de Creatividad	26
<b>3.4 Selección de Conceptos</b>	<b>34</b>
3.4.1 Metodología de Selección de Conceptos	35
3.4.2 Herramientas y Técnicas de Selección de conceptos	35
<b>3.5 Desarrollo de Conceptos</b>	<b>42</b>
<b>3.6 Modelización</b>	<b>45</b>
3.6.1 Herramientas y Técnicas de Modelización	45
<b>3.7 Diseño de Detalle</b>	<b>51</b>
3.7.1 Consideraciones en el Diseño de Detalle	52

---

3.7.2	Herramientas y Técnicas en el Diseño de Detalle	53
<b>4</b>	<b>APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO</b>	<b>59</b>
4.1	Búsqueda de Información	59
4.2	Especificaciones del Producto	66
4.3	Generación de Conceptos	69
4.4	Selección de Conceptos	73
4.5	Desarrollo de Conceptos	86
4.6	Modelización	91
4.6.1	Armazón de la Máquina	92
4.6.2	Modelización por Métodos Numéricos (FLAC 3D)	98
4.6.3	Comprobación de los Factores de Seguridad	112
4.7	Diseño de Detalle	116
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>128</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>133</b>
<b>7</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>134</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>136</b>

---

# 1 INTRODUCCIÓN

En general, las máquinas empleadas para la excavación del macizo rocoso, conocidas como *Tunnel Boring Machine* (TBM) o más comúnmente como tuneladoras o topos, excavan el frente de roca a sección completa mediante la acción combinada de la rotación y el empuje.

Durante la etapa de estudio y construcción de un proyecto de excavación, es de vital importancia contar con la información necesaria sobre las condiciones de la roca así como las características del método de excavación empleado. Concretamente, predecir las velocidades de avance de topos depende no sólo de las características litológicas, esfuerzos e hidrología del terreno sino también de las características de la máquina y su interacción con el macizo rocoso a excavar. Para ello existen métodos empíricos que, basándose en las variables que intervienen en la resistencia de un macizo rocoso, y asignándoles valores numéricos de acuerdo a su incidencia, establecen relaciones matemáticas para obtener una característica numérica que permita estimar los diferentes parámetros de ejecución de un proyecto. El problema es que a pesar de la existencia de estos métodos empíricos, hay pocos ensayos que reproduzcan fielmente las condiciones de excavación subterránea empleando TBM.

Partiendo de esta premisa, se plantea el diseño de un dispositivo que permita realizar ensayos en roca que ayuden a hacer un análisis de los parámetros involucrados en el proceso de excavación, empleando como útil de corte discos similares a los utilizados por los topos, y reproduciendo la acción combinada de rotación y empuje.

En este estudio, tomando como referencia los principios y etapas para llevar a cabo un buen diseño de un producto descritos por Ken Hurst en su obra "*Engineering Design Principles*", se aplicarán al desarrollo del equipo de ensayo con discos de corte, sirviendo además esta metodología como una guía de implantación para el diseño de nuevos productos.

## 1.1 OBJETIVO

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el estudio de las técnicas empleadas

---

para el proceso de diseño en ingeniería y su aplicación concreta en una máquina de ensayos de discos de corte, tomando como referencia los principios propuestos por Ken Hurst. Con ello se pretende mejorar el proceso de diseño identificando la problemática en cada etapa de diseño, y proponiendo herramientas que permitan afrontar con éxito cualquier diseño nuevo de un producto.

Para ello se proponen como objetivos específicos:

- Realizar un análisis y descripción de las metodologías vinculadas al diseño en ingeniería.
- Establecer un modelo de la secuencia de etapas o fases a realizar en el diseño que sirva como guía para su utilización en futuros proyectos con características similares.
- Exposición de diferentes herramientas y técnicas que pueden aplicarse según la etapa del proceso de diseño en el que se encuentre el proyecto.
- Aplicación práctica de la metodología propuesta al diseño de un dispositivo que consiste en una máquina para la realización de ensayos en roca empleando discos de corte.

## **1.2 ESTRUCTURA DE LA DOCUMENTACIÓN**

La documentación del presente Trabajo Fin de Máster se encuentra estructurada en ocho apartados y cinco anexos.

En el primer apartado se da una aproximación a la temática que se aborda en este trabajo, así como los objetivos establecidos en el proyecto, junto con la presente exposición de cómo se distribuye la documentación.

En el segundo apartado se muestran los fundamentos de hecho para justificar la importancia del proyecto llevado a cabo.

El tercer apartado corresponde a la explicación detallada de la metodología empleada para el proceso de diseño, junto con las recomendaciones de herramientas y técnicas a emplear según el caso. Dentro de este apartado:

- se realiza una exposición de las fuentes de información a consultar para la realización del estado del arte,
- propuesta de redacción de las especificaciones del producto, indicando diferentes técnicas para su desarrollo así como los conceptos fundamentales que deben tenerse en cuenta a la hora de describir la que se considera como una de las fases críticas de diseño,
- exposición de las diferentes técnicas que existen para la generación de los conceptos básicos a desarrollar en todo diseño de un nuevo producto, tomando como referencia las especificaciones previamente elaboradas,
- descripción del modo de selección de los conceptos, es decir, la clasificación, ponderación y selección de las limitaciones especificadas seguido de una evaluación detallada de cada concepto, para lo cual se proponen diferentes herramientas,
- indicación de los aspectos que deben tenerse en cuenta en la realización de los primeros bocetos y desarrollo de los conceptos seleccionados,
- explicación de los modelos que existen para que los cálculos permitan asegurar la viabilidad del dispositivo,
- diseño detallado, que debe realizarse en la forma y dibujos necesarios y notas para que sea completado por producción.

El apartado cuatro corresponde a la puesta en práctica de la metodología expuesta a través de la utilización de herramientas y técnicas al dispositivo de ensayo planteado. Dentro del mismo se realiza:

- exposición del estado del arte de la máquina de ensayo,
- definición completa de las funciones y limitaciones para redacción de las especificaciones del producto,
- generación de conceptos tomando como referencia las especificaciones ya redactadas,
- análisis de la decisión final adoptada para el dispositivo,
- muestra de los dibujos iniciales generados para el diseño de la máquina,
- los cálculos y modelos realizados para el ejemplo propuesto, en lo que se refiere a asegurar la estabilidad del dispositivo,

- descripción detallada de los elementos que conforman la máquina de ensayos con discos de corte,

El apartado cinco expone los resultados fundamentales extraídos de la aplicación de la metodología al dispositivo de ensayo.

El apartado seis incluye las conclusiones y recomendaciones del Trabajo Fin de Máster.

El apartado siete contiene las líneas futuras que se proponen para el dispositivo presentado.

Por último el apartado ocho contiene las referencias bibliográficas utilizadas para la realización de este trabajo.

En cuanto a los ANEXOS, el ANEXO I es una recopilación de diferentes buscadores existentes para la búsqueda de información, fundamentalmente, de base científica. En el ANEXO II se muestra una representación de bocetos iniciales generados en el proceso de diseño del dispositivo. En el ANEXO III se muestran toda una serie de cálculos realizados para justificar la elección del armazón estructural de la máquina. En el ANEXO IV se pueden ver diferentes planos en dos y tres dimensiones del dispositivo, y finalmente, en el ANEXO V se muestra la Patente de Invención obtenida de la máquina objeto de estudio.

---

## 2 FUNDAMENTO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Como se desarrollará posteriormente, existen modelos basados en índices de clasificación del macizo rocoso así como ensayos lineales con discos de corte que estudian los parámetros involucrados en la excavación con topes, sin embargo ni uno ni otro pueden asegurar un cálculo preciso de la velocidad de penetración en túneles. Es por ello que se plantó la realización de un dispositivo, que utilizando como base el funcionamiento de las máquinas de control numérico computarizado (ampliamente utilizado en la industria para la creación y moldeo de piezas complejas de manera rápida y precisa, pero sin los altos niveles de precisión requeridos por éstas) permitiera hacer ensayos en roca, y controlando además de los ejes de referencia X, Y y Z, el giro del disco que simule la trayectoria real de los mismos durante la ejecución de una obra subterránea.

Si bien es cierto que cada proyecto es diferente y no es posible establecer hasta no conocer el problema de diseño a resolver, criterios o normas para solucionarlos, pues todos y cada uno de ellos poseen características únicas que responden a requerimientos específicos, sin embargo sí es posible enunciar ciertas etapas generales aplicables a todo proyecto que implique el diseño de un nuevo dispositivo y que aporten un modo racional de proceder, aumentando, en la medida de lo posible, la consecución exitosa de los objetivos propuestos.

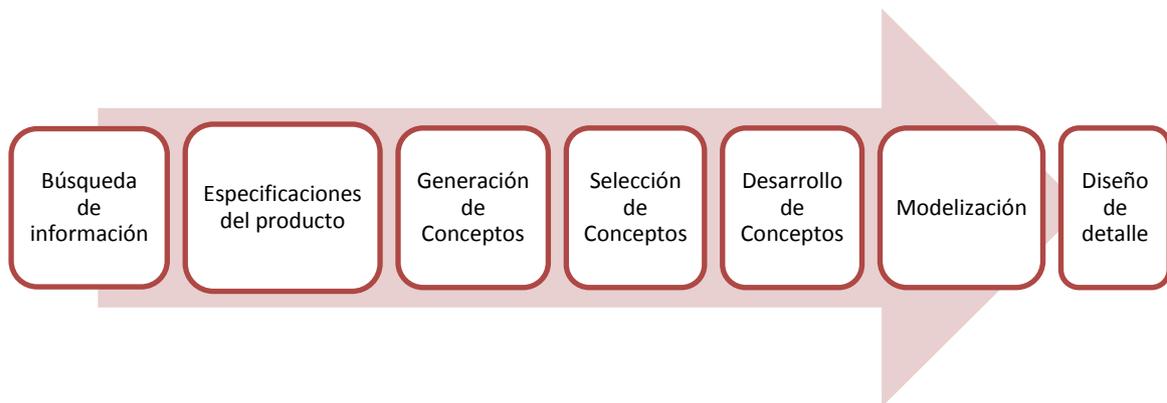
El presente Trabajo Fin de Máster es un trabajo de recopilación de conceptos y herramientas consideradas como fundamentales para el diseño en ingeniería, y aplicado a un dispositivo para ensayo en roca, siguiendo los criterios que Ken Hurst plantea en “*Engineering Design Principles*”.

Se pretende que este estudio sirva de marco o metodología a seguir a la hora de diseñar un nuevo producto, proporcionando un importante número de técnicas orientadas a la conclusión óptima de los objetivos, de manera eficaz y eficiente, y sea utilizado como fuente de consulta por estudiantes y profesionales.

### 3 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

Es necesario que el diseño de nuevos productos en ingeniería se articule bajo una metodología de diseño, que permita abordar mejor las soluciones de diseño y de determinar si son factibles, buscando de este modo la máxima efectividad. Está claro que existen diferentes combinaciones de pasos y procedimientos de diseño, no habiendo una única combinación óptima posible, pero en cualquier caso, es innegable que establecer un proceso de diseño proporciona un método efectivo para garantizar resultados organizados y útiles.

En este sentido, el proceso de diseño debe llevarse a cabo siguiendo un esquema metodológico que incluya las etapas o fases generales que se muestran en la Figura 3.1.



**Figura 3.1.- Fases fundamentales del proceso de diseño**

A continuación se desglosará de manera más detallada cada una de estas etapas, describiendo, para cada una de ellas, las herramientas y técnicas más destacables para su ejecución, así como aquellos aspectos que pueden ser de interés.

#### 3.1 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

La búsqueda de información es fundamental para el diseño en ingeniería. Por ello el proceso de diseño debe empezar con un análisis del problema que consiste en describir la situación existente así como los aspectos problemáticos conocidos que lo rodean.

El proceso de resolución de los problemas implícitos en un proyecto puede

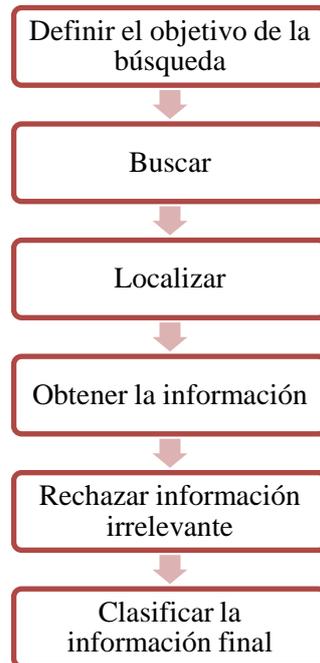
definirse como un proceso de transformación a través de operaciones de análisis, síntesis, evaluación y realimentación. La información es el operando sobre el que el proyectista aplica sus conocimientos y medios técnicos para ir transformándola en otro tipo de información, ordenada y estructurada de distinta forma. La información es una necesidad constante durante todo el proceso de desarrollo del producto, aunque, evidentemente resulta especialmente importante en la fase inicial ya que es necesario aclarar todos los objetivos que se han considerado básicos para obtener una solución aceptable.

Las fuentes de información posibles son numerosas y variadas. Una buena estrategia consiste en plantear primero una búsqueda amplia de la información que podría estar relacionada con el problema para después focalizarse sobre las direcciones más prometedoras. Esto permite a su vez conocer el estado de la técnica que condicionará el planteamiento del proyecto.

### ***3.1.1 DESARROLLO DE LA BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN***

La búsqueda de información es necesaria aunque por norma general, se suele considerar como la parte menos productiva que acapara horas de trabajo del diseñador. Por ello el objetivo es llevar a cabo una búsqueda de información de la manera más eficiente que sea posible. Hay que determinar los problemas esenciales relativos al diseño, es decir, averiguar cuáles son los aspectos sobre los que se quiere investigar, dado que cuanto más concreto sea el tema, más fructífera será la búsqueda.

Las etapas fundamentales que deben llevarse en cualquier búsqueda de información son las recogidas en la Figura 3.2.



**Figura 3.2.- Flujo de búsqueda de información**

En primer lugar debe hacerse una clara identificación de la finalidad de la búsqueda y el tipo de información que se requiere. Es entonces cuando se puede llevar a cabo la búsqueda de la información.

La siguiente etapa es muy importante. Una primera búsqueda a menudo permite identificar multitud de fuentes potenciales de información y una consecuencia inevitable es que gran parte de dicha información no resulte relevante para el problema en cuestión, debiendo ser desechada. Por ello hay que ser consciente que durante esta etapa en ocasiones se produce un exceso de información que no contribuye más que a dificultar su utilización y retrasar el proyecto.

Finalmente es esencial que toda la información se clasifique de tal modo que resulte sencillo en un momento dado volver a recuperarla, para lo cual deberían destacarse las áreas potencialmente interesantes de cara a este proceso de realimentación. En este sentido es recomendable construirse una base de datos con un pequeño resumen de la información encontrada para que pueda servir de referencia para posteriores consultas.

Acabado este primer bloque de búsqueda de información, el diseñador estará en condiciones de plantear correctamente el diseño que debe acometer.

---

### 3.1.2 HERRAMIENTAS DE BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

Conviene conocer los distintos tipos de fuentes existentes y las diferencias que hay entre ellas. Según el origen de las fuentes, la información obtenida a través de ellas puede ser de alto o bajo coste económico, de corto o largo tiempo de adquisición, y de diversa incertidumbre.

A continuación se nombran algunas de las fuentes bibliográficas que pueden ser de interés para la realización del diseño de un producto.

#### ➤ *PROPIEDAD INDUSTRIAL: PATENTES Y MODELOS DE UTILIDAD*

Toda innovación, sea una invención o una creación de forma es susceptible de protección legal mediante una modalidad de propiedad industrial que garantiza a su titular un derecho exclusivo a su explotación. Sin embargo aquí no se pretende exponer cómo proteger una idea, sino que se trata de la utilización de las patentes como fuente de información valiosa. Por ello, la patente como documentación interesa no como documento legal, sino como portador de información científico – técnica muy valiosa que, por su propia naturaleza, no se encuentra en ningún otro lugar.

La lectura de una patente puede ser difícil, por el hecho de tratarse de un documento legal que necesita ser expuesto en un lenguaje específico. Además la tecnología estándar industrial rara vez se presenta, centrándose el documento exclusivamente en la novedad de los componentes que está contenida en la invención. De modo que hay que ser conscientes de las deficiencias de información que del mismo modo se pueden obtener. Por lo tanto, al utilizar palabras clave para la búsqueda, se deben emplear nombres de componentes así como aquellas palabras que definen el conjunto de la máquina.

En cualquier caso es indudable que el uso de las patentes como fuente de información asegura ventajas que superan sus limitaciones, también que brinda información tecnológica y que los documentos presentan una estructura común. A continuación se agrupan las principales ventajas de la utilización de las patentes como

---

fuentes de información:

- Respecto de la calidad de la información:
  - Información tecnológica novedosa: garantizada por los requisitos de patentabilidad. Divulga información nueva, pero también la que ya se conoce a través del estado de la técnica. En algunos casos, se adjunta un sumario con los avances tecnológicos de un sector o se publica el «informe de búsqueda» que incluye referencias encontradas para determinar la novedad de la invención.
  - Exclusiva: no divulgada en otros medios. Incluye datos del solicitante, fórmulas, dibujos. Se calcula que entre el 70 y el 80% de la información contenida no es publicada en otro tipo de bibliografía. Es la única fuente de información que liga en cada documento a una empresa con sus tecnologías y a sus mercados de interés estratégico.
  - Concentrada y completa: la descripción es tan detallada que puede replicarse la invención. Además debe exponerse en un lenguaje apropiado
  - Diversa: abarca todos los sectores.
- Con referencia a su estructura:
  - Clasificada: el sistema de clasificación único favorece la recuperación ágil y con eficacia. Permite acceder a información concentrada sobre un sector determinado.
  - Estructurada: permite recuperar rápidamente por campo de datos o por agrupamiento en categorías. Además las patentes se caracterizan por tener una estructura uniforme que facilita la lectura del documento comenzando por un resumen que simplifica la tarea y ahorra tiempo.
- En relación con su disponibilidad:
  - Pública: inherente a la condición de la patente, ya que para ser titular de una patente el solicitante debe hacer pública su invención.
  - Accesible: los documentos de patentes están accesibles, en su gran mayoría, en Internet. En este caso existen bases de datos de las oficinas de patentes disponibles de manera gratuita. A nivel nacional, destacan las

---

bases de datos disponibles en la Oficina Española de Patentes y Marcas (<http://www.oepm.es/es/index.html>). Pero también existen otras bases de datos internacionales que difunden gratuitamente información sobre patentes (<http://www.freepatentsonline.com/>; <http://www.ipo.gov.uk/>).

Por otra parte hay que ser conscientes igualmente de las limitaciones que se presentan en la utilización de las patentes, pues éste es un campo en constante crecimiento, donde el idioma en que se publica no siempre es conocido por el usuario y que no toda invención se patentada, pues existen otros mecanismos de protección de la invención por los que se decantan las empresas, como el secreto industrial y la información confidencial.

### ➤ *MATERIAL CIENTÍFICO: REVISTAS, INFORMES DE INVESTIGACIÓN Y TESIS DOCTORALES*

La importancia del material científico contenido en revistas y tesis constituye uno de los medios de difusión de conocimiento más reconocidos de los documentos con finalidades profesionales, académicas y científicas. Las revistas se caracterizan por la intencionalidad de prolongarse en el tiempo.

Constituyen un caso particular de publicaciones periódicas. Se trata de publicaciones colectivas que constituyen uno de los principales instrumentos de transferencia de la información en la actualidad, hasta el punto de que la mayor parte de la información científica se transmite por los artículos de revista. Todo tema nuevo se aborda en primer lugar en artículos, adelantando hipótesis y conclusiones, para posteriormente desarrollarlo en libros en ocasiones.

El contenido de las revistas científicas puede variar de unas a otras, pero entre sus distintos elementos o secciones, hay que destacar dos: los trabajos científicos originales y los trabajos de revisión o puestas al día, noticias, reseñas bibliográficas, etc.

Existen diferentes repertorios de revistas de todas las materias y países. Al igual que se expuso anteriormente para el caso de las patentes a través de diferentes bases de datos disponibles en Internet, y detallados en el ANEXO I, es posible acceder al material científico de manera actualizada.

Por otra parte, los informes de investigación recogen los resultados, parciales o totales, de los trabajos de investigación realizados por instituciones o empresas industriales. Constituyen documentos únicos e irremplazables para tener acceso a información sobre investigaciones punteras.

Del mismo modo sucede con las tesis doctorales, aunque con frecuencias, sobre todo en el campo científico, se publican los resultados de las tesis mediante artículos de revistas científicas, es necesario a menudo, localizar las tesis doctorales, con la consiguiente dificultad de no conocer la universidad en que fue presentada y no poder solicitarla. Existen varios repertorios de tesis doctorales, en España se dispone de la base de datos TESEO ([www.teseo.es](http://www.teseo.es)) como mayor exponente recopilador de tesis.

### ➤ **CATÁLOGOS COMERCIALES**

Se trata de publicaciones de fabricantes o distribuidores de maquinaria, materiales, instalaciones y bienes de equipo que recogen las características fundamentales de productos que ofrecen. Muchas veces incluyen tablas comparativas de diferentes series de productos fabricados. La información contenida en ellos puede ser poco fiable, incompleta y ambigua, por lo que le diseñador está obligado a comprobar o contratar esta información antes de aceptarla como válida.

Por lo general este tipo de información se emplea en una fase más avanzada del diseño de productos, como es la selección de los conceptos que se hayan ido generando. Sin embargo puede ser también una fuente de información inicial que permita tener un conocimiento de los productos disponibles en el mercado y que puedan estar relacionados con el objeto de estudio.

### ➤ **OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN**

Aunque las fuentes de información quizás más interesantes son las expuestas anteriormente, existen igualmente otras fuentes que pueden resultar en ocasiones de interés y que se citan brevemente a continuación:

- **Normas:** la norma es un documento, aprobado por un organismo competente, que establece reglas y requisitos que han de cumplir los distintos productos,

procesos, etc. Se trata pues, de un documento de carácter especial, pero que resulta indispensable en muchos campos, especialmente en el terreno industrial. Como organismo internacional de normalización, se encuentra la *International Standards Organization*, que prepara las normas internacionales ISO, que posteriormente son transformadas a normas nacionales, concretamente las normas UNE, en el caso de España. De esta manera se han convertido en una fuente muy útil de información confiable y que en muchas áreas de ingeniería existen rigurosos estándares que deben cumplirse a la hora del diseño, sobre todo en materia de seguridad, y que deben ser atendidas. De ahí su interés como fuente de información, más que por la posibilidad de aportar nuevas ideas, por la necesidad de tener que cumplir con unos requisitos específicos.

- Actas de congresos: a pesar de que muchos de los trabajos que se presentan a congresos y reuniones se publican posteriormente, otras veces sólo es posible encontrarlos en las actas de congresos o conferencias, en las que se dan a conocer por primera vez, los resultados de muchos trabajos de investigación. Se trata de documentos difíciles de localizar en muchas ocasiones.
- Índices y bases de datos bibliográficos: se trata simplemente de referencias bibliográficas de un conjunto de documentos, ordenadas en función de alguna característica esencial o formal. Realmente exigen recurrir a bases de datos de revistas científicas para poder extraer el contenido de interés.

## 3.2 ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

La decisión de desarrollar un nuevo producto parte de la manifestación de una necesidad o del reconocimiento de una oportunidad que puede tener numerosos orígenes, desde la petición explícita de un cliente (como un producto por encargo o una máquina especial) hasta un estudio de mercado del fabricante (una nueva oferta o el rediseño de un producto) entre otros.

Establecer la definición del producto es una etapa fundamental para su correcto desarrollo posterior. Las deficiencias en la definición del producto llevan a menudo a desenfocar su resolución, dedicando muchos esfuerzos a aspectos poco relevantes, o

desatendiendo aspectos fundamentales.

La definición del producto se establece a través de las especificaciones, lo que constituye la guía y referencia para su diseño y desarrollo. Pero también hay que tener en cuenta que si la especificación es demasiado ambiciosa puede repercutir en que se incremente el coste del producto así como un aumento de la dificultad de fabricación. Por ello hay que reconsiderar la especificación cuando sea razonable, estableciendo un proceso de iteración entre la definición del producto y su diseño conceptual. Como se verá más adelante, la especificación actúa como una propuesta mientras que el diseño conceptual confirma o no la viabilidad.

A continuación se expondrá el proceso que debe seguirse para la definición y diseño de las especificaciones de un producto, también conocidas como PDS (*Product Design Specification*).

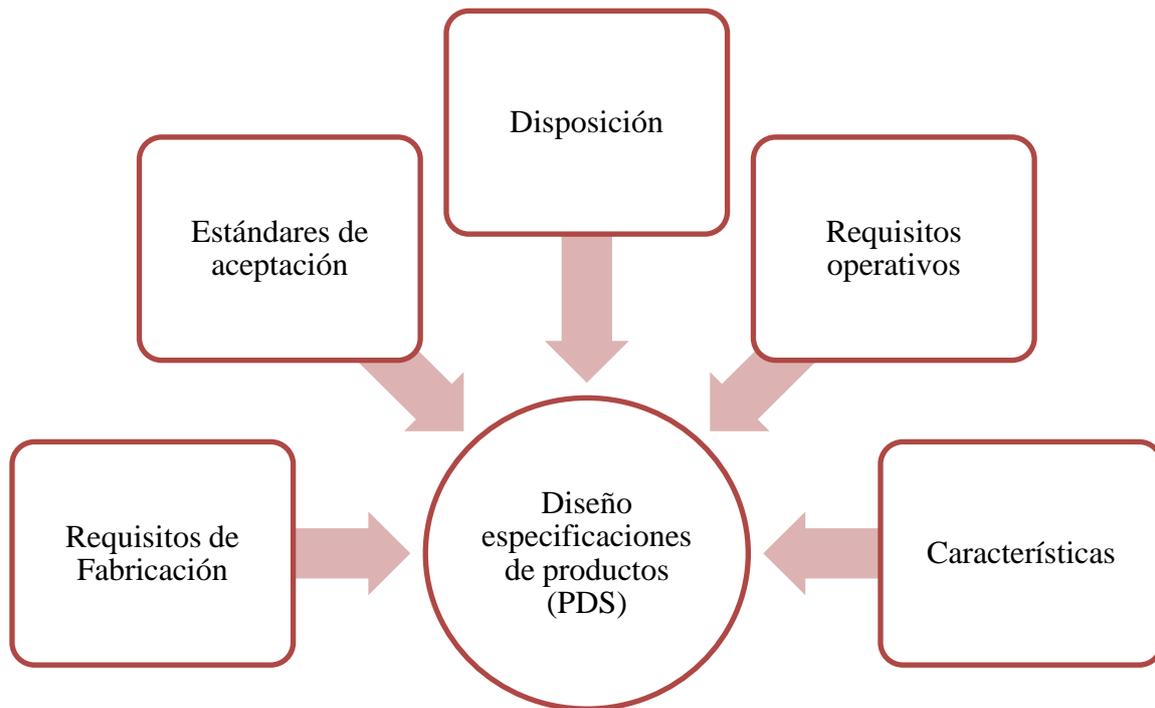
### ***3.2.1 HERRAMIENTAS PARA LA ELABORACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES***

En primer lugar debe tenerse en cuenta que la especificación de un producto es la manifestación explícita del conjunto de determinaciones, características o prestaciones que debe guiar el diseño y desarrollo del producto.

La especificación puede ser muy larga y minuciosa o muy corta, según la conveniencia en cada caso. Conviene que la especificación establezca los requerimientos y los deseos, pero que evite la descripción de formas constructivas que constituyen tan sólo una de las posibles soluciones. En este sentido la especificación debe contener toda la información necesaria para realizar el diseño del producto, de manera clara y concisa, no conteniendo generalidades ni ambigüedades. Los objetivos deben ser realizables, y los valores numéricos que se establezcan deben ser lo más exactos posible, con indicación de tolerancias. Del mismo modo debe contemplar todas las restricciones a las que pueda verse sometido el producto.

Los principales criterios que se emplean para ayudar en la redacción de las especificaciones se muestran en la Figura 3.3. Hay que tener en cuenta que no se deben considerar como un listado de control a seguir exhaustivamente para definir por

completo una especificación. Los proyectos de diseño, por naturaleza son variados y diferentes uno respecto a otro. Sin embargo, el empleo de técnicas basadas en la elaboración de una lista de verificación puede ayudar a proporcionar una buena base sobre la que empezar a elaborar un producto.



**Figura 3.3.- Aspectos a considerar en la elaboración de las especificaciones**

El contenido de cada uno de estos cinco aspectos mostrados en la Figura 3.3 se explicarán a continuación:

### ➤ **CARACTERÍSTICAS**

Esta parte constituye la parte más importante de la especificación, pues en ella se define lo que se espera del producto. Las características se exponen de forma explícita, de tal manera que los valores indicados han de ser realistas para que la ejecución del proyecto sea posible. Entre las características que deben definirse están:

- **Funciones:** descripción de las funciones principales, ocasionales y accidentales del producto (si es necesario, con esquemas). A menudo el producto a diseño dispone de múltiples funciones que, una vez identificadas, conviene dividir las en primarias y secundarias. Pueden ser

de naturaleza variada: mecánicas, eléctricas, ópticas, magnéticas, acústicas, etc. Por ejemplo, la función principal de un motor en un vehículo es accionar las ruedas. Pero también deben incluirse funciones secundarias, como puede ser el suministro de calefacción en el interior del vehículo.

- **Fuerzas**: magnitud, dirección y sentido de fuerzas y momentos; variación en el tiempo; desequilibrios y deformaciones admisibles. Al igual que las funciones, las fuerzas se pueden dividir en primarias y secundarias. Las fuerzas primarias directamente son las debidas a la función que se está prestando. Las vibraciones, por ejemplo, surgen como consecuencia de la utilización de los productos. A menudo las fuerzas son difíciles de cuantificar sin datos empíricos, por lo que se recomienda que las especificaciones en este sentido, se definan de tal modo que puedan cumplirse cómodamente.
- **Estética**: en algunos casos no se trata de un aspecto tan importante, en particular cuando el dispositivo o estructura no se ve. Sin embargo, para muchos productos, generalmente de consumo o estructuras, la apariencia o estética es un aspecto importante en el diseño ya que puede hacer que el producto sea más atractivo que los de la competencia. La apariencia se establece en la especificación definiendo aspectos tales como la forma, el color y el estado superficial. Cualquier definición en una especificación que se refiere a la apariencia de un producto inevitablemente se verá más como un aspecto cualitativo más que cuantitativo, y debería incluir una analogía con las cualidades que se encuentran en los productos existentes. Un buen diseño debe aunar los aspectos de funcionalidad y estética, teniendo en cuenta que la elección adecuada de los materiales y la fabricación tienen influencia en la consecución de la estética.
- **Vida útil**: la vida prevista del producto, es decir, el tiempo estimado en el que el producto funcionará de forma correcta sin necesidad de realizar grandes reparaciones o revisiones. Usualmente esto se hace mediante la especificación del número de ciclos de funcionamiento en lugar de

unidades de tiempo. Dentro de este número de ciclos también se debe indicar un nivel aceptable (de modo porcentual) de fallos aleatorios o averías. Aunque se indicará más adelante en el apartado correspondiente a los requisitos operativos, la fiabilidad está íntimamente vinculado al mantenimiento. Pero debe tenerse en cuenta que la sobreestimación de esta vida dará lugar a un encarecimiento del producto.

- **Impacto medioambiental:** del conocimiento del entorno en el que se va a utilizar el producto dependen muchas de las soluciones a adoptar, así como los materiales a emplear. Estas condiciones medioambientales incluyen en rango de temperaturas y humedad del entorno en que se va a emplear el producto, aspectos que afecten a la corrosión, suciedad y polvo que puedan afectar al producto, presión, vibraciones, etc. Es importante considerar no sólo el entorno de funcionamiento del producto, sino también las condiciones ambientales de fabricación, almacenamiento y transporte. Además deben especificarse las restricciones que pueda haber por las dimensiones del producto, de cara a determinar el espacio disponible para la manejabilidad del producto.
- **Coste del producto:** la mayor parte de los productos se construyen a partir de la determinación de un determinado coste, bien definido por un cliente o por los precios que ofrece la competencia. El coste constituye el factor principal sobre el que se va a valorar el éxito del producto, condiciona los aspectos productivos y organizativos. Asumiendo que aunque se cumplan las expectativas marcadas en la especificación, si el precio es excesivo frente a productos similares, las posibilidades de aceptación en el mercado serán escasas. El coste previsto de producción no es el de venta, la diferencia entre ambos marca el beneficio o las pérdidas de la empresa, y en las especificaciones se debe trabajar con el coste de producción o fabricación, y no con el precio de venta.
- **Ergonomía (factores humanos):** si un producto está destinado al uso humano, entonces deben tenerse en cuenta las características de tales usuarios. Los aspectos ergonómicos establecen la interacción entre el

usuario y el producto. Las funciones que realiza el usuario generalmente consisten en interpretar los datos a menudo facilitados a través de una pantalla, y tomar una decisión y realizar una acción de control. En la especificación deben establecerse los criterios a aplicar para ser tomados en cuenta en la etapa de diseño, como pueden ser la disposición de controles y mando, esfuerzos de operación, forma de mandos, influencia de las vibraciones generadas, ruidos generados, espacio para el operador, etc.

- **Calidad:** la calidad del producto debe con las exigencias del mercado y la calidad de todos los componentes deben ser compatibles. Se consideran básicos para conseguir una buena calidad las tolerancias, los acabados superficiales y los materiales, entendiéndose que deben ser los justos para no encarecer el producto. En una empresa, el Departamento de Control de Calidad es el responsable de su vigilancia desde el inicio del proyecto hasta la postventa.
- **Peso:** en algunas industrias, como por ejemplo la aeroespacial, ésta es una de las limitaciones más críticas. Sin embargo esto no es siempre lo común. En general, en cualquier producto que involucre movimiento, la reducción de peso es una ventaja, mientras que cuando se requieren condiciones de estabilidad, puede ser necesario que el peso sea mayor. Por lo general, un peso mínimo significa menos material, lo que se traduce en costes de producción reducidos y ventajas económicas.
- **Ruido:** debe especificarse los límites superiores de niveles de ruido que pueden emitirse por el producto. La normativa difiere según el país, así que o bien se indica el estándar que se aplica en un determinado país, o bien el límite más bajo entre los países destinatarios de las exportaciones. Estos estándares representan el máximo nivel de ruido que es aceptable, pero también se pueden especificar los niveles más bajos de ruido, por ejemplo, para ganar ventaja frente a la competencia.

---

## ➤ REQUISITOS DE FABRICACIÓN

- **Procesos:** en las consideraciones de los procesos de fabricación deben tenerse en cuenta aspectos como los medios disponibles, las capacidades de fabricación en función de las cantidades a fabricar o los suministradores de las partes o equipos suministrados por otras empresas. Es decir, deben especificarse los recursos externos de los que se dispone para la fabricación del producto, considerando tanto la calidad como la fiabilidad requerida a la fuente de suministro.
- **Materiales:** la elección de los materiales en la mayor parte de los casos se realiza durante el proceso de diseño, una vez descrita la especificación, siendo el equipo de diseño el responsable de tal elección. No obstante en muchos casos el cliente o la información obtenida del análisis preliminar puede determinar la elección de un determinado material. Igualmente en ocasiones hay que considerar tanto los materiales como los envases del producto sin que ello suponga una restricción al equipo de diseño necesariamente. Entre los criterios que hay que considerar está la corrosión y resistencia al desgaste, la inflamabilidad, densidad, dureza, textura, color, estética y reciclabilidad. También existen regulaciones que rigen el uso de materiales peligrosos que deben ser incluidos en la especificación cuando proceda.
- **Ensamblaje:** en determinados tipos de maquinaria, el ensamblaje puede dar lugar a costes en muchos casos equiparables al de la propia máquina. El método de montaje debe ser especificado: automático, manual, o montaje en línea. E igualmente se debe indicar aspectos relacionados con la facilidad de desmontaje. En la especificación se incluirán todos los aspectos relativos a la instalación, debiendo realizarse su valoración por la organización de fabricación.
- **Transporte y embalaje:** el proceso de almacenado y transporte implica un aumento en el coste. Por ello tanto el tamaño como el peso máximo para el transporte adecuado debe indicarse. La forma también es importante en ocasiones, ya que apilar productos juntos puede reducir

sustancialmente los costos de transporte. También puede ser importante para asegurar productos de gran tamaño que se puedan montar y desmontar fácilmente para el transporte. Son datos necesarios de la especificación la forma de transporte, tipo de protección a ofrecer frente a golpes, vibraciones, etc, así como el sistema de anclaje y modo de etiquetado. Los gastos de embalaje y transporte deben ser añadidos a los costes de fabricación para asegurar que el producto siga siendo competitivo dondequiera que se utilice.

- **Cantidad:** la cantidad de productos a fabricar tiene un aspecto significativo en los procesos de fabricación a seguir y de los materiales a emplear, por tanto el diseño ha de tener en cuenta este aspecto. Una gran cantidad de productos a fabricar permitirá la fabricación en serie y por tanto una reducción de costes. Las fabricaciones limitadas pueden determinar cambios en los procesos de fabricación influyendo incluso en el diseño de la forma de los componentes.
- **Fecha de entrega:** es importante que los plazos sean realistas para cada etapa del proceso de diseño y de producción. Esto es especialmente cuando se tiene una fecha de entrega acordada con el cliente y por ello a veces se incluyen penalizaciones en los contratos por retrasos en las fechas de entrega. Por tanto, la fecha en que tiene que completarse cada etapa del proceso debe especificarse desde el principio. Una especificación completa debería incluir las fechas en que se completará el diseño, fabricación, montaje, pruebas, puesta en servicio y entrega del producto totalmente funcional.

### ➤ **ESTÁNDARES DE ACEPTACIÓN**

- **Inspección:** debe especificarse el grado de conformidad a la normativa de acuerdo con la legislación y los objetivos establecidos. El grado de cumplimiento requiere especificar tolerancias. El incumplimiento de las leyes de responsabilidad sobre el producto puede dar lugar a cuantiosas indemnizaciones.

- **Pruebas**: la mayor parte de los productos, requieren antes de su lanzamiento al mercado su calificación o certificación de acuerdo a unos determinados protocolos de pruebas (especialmente en productos aeroespaciales) realizados sobre un determinado número de ejemplares de cada lote de fabricación. Deben especificarse los métodos de verificación para el producto junto con los plazos para la realización de las pruebas necesarias. En la especificación debe incluirse la cantidad de elementos a probar nivel acordado de pruebas de muestreo, cargas límite, ciclos de carga, ensayos ambientales, etc.
- **Normas**: la mayor parte de productos han de cumplir con una determinada cantidad de Normas, que contienen información acerca de los requerimientos de los mismos. Existen miles de Normas que pueden afectar de distinta forma a los componentes del producto. Se suelen incluir normas nacionales, internacionales o política de la propia empresa. Además puede haber otras muchas reglas, reglamentos y códigos de conducta que se deben seguir.
- **Patentes**: como ya se expuso anteriormente, las patentes son muy útiles como fuente de información, especialmente cuando se está comenzando un nuevo diseño sin que se tenga experiencia previa en ese campo en particular. Sin embargo, cuando se desarrollo un nuevo producto es necesario asegurarse de que no existen patentes que puedan dar lugar a demandas judiciales. El diseño no debe infringir ninguna patente identificada como relevante. Por otra parte esta aparente dificultad puede ser un incentivo para que los diseñadores desarrollen nuevas ideas.

## ➤ **DISPOSICIÓN**

- **Legislación**: cualquier producto debe cumplir con la legislación de los países donde se pretende comercializar. Ejemplos de ellas son las leyes sobre uso, legislación sobre salud y seguridad, directivas europeas, inspecciones en fábrica o leyes medioambientales. Por tanto, cualquier legislación que regula la venta de un producto debe especificarse.

Además la legislación exige que todos los materiales utilizados puedan ser fácilmente identificados para su posterior reciclado o eliminación al final de la vida útil del producto.

- **Política de la empresa:** pretenden brindar a la empresa importantes oportunidades de publicidad así como mejorar su posición competitiva. Del mismo modo en este apartado se debe indicar cualquier limitación que tenga la empresa para la fabricación o venta del producto.
- **Peligros:** los riesgos potenciales que pueden ocasionar dificultades en el final de vida de un producto se debe identificar y especificar.

### ➤ **REQUISITOS OPERATIVOS**

- **Instalación:** cuando la instalación de un producto es compleja se debe de especificar. Es especialmente importante cuando se diseñan un pequeño número de dispositivos de gran tamaño. Las limitaciones deben incluir la construcción, el montaje, el tiempo necesario, el suministro de instrucciones y los niveles de experiencia necesarios para la instalación.
- **Uso:** se refiere a la utilización del producto, cuyo coste asociado debe reducirse al mínimo. Los factores que influyen en esto son entre otros, el número de operadores requeridos, el nivel de experiencia exigido para estos operadores, o el consumo de energía máximo tolerable: continuo las 24 horas del día, número de paradas y arranques en una escala de tiempo, etc. Por ejemplo, una especificación que contemple este concepto debería incluir aspectos relativos a la potencia eléctrica mencionando que sea en tres fases y de 380 a 420 voltios.
- **Mantenimiento:** la vida de servicio debe ser lo suficientemente amplia para no necesitar de grandes revisiones durante el tiempo que se espera utilizar el producto. La mayor parte de los productos necesitan de determinadas acciones de rutina para asegurar una operación eficiente. Estas operaciones es necesario preverlas para determinar los accesos de forma fácil a los lugares en que se han de realizar, así como para facilitar el desmontaje y montaje de aquellos componentes que puedan ser

susceptibles de averías y por tanto necesaria su sustitución. Las instrucciones de funcionamiento del producto, operación, montaje y desmontaje, pruebas, lista de piezas de repuestos y de utillajes necesarios se describen en los Manuales de mantenimiento y éstos se definen de acuerdo con el Departamento de Diseño.

- **Seguridad**: existen muchas normas, una gran cantidad de leyes y códigos de buenas prácticas que se refieren a todos los aspectos de seguridad de los productos. Éstos deben indicarse en toda PDS. Hay diferentes riesgos que deben tenerse en cuenta, desde riesgos de origen no humano como la toxicidad, descargas eléctricas, radiaciones, ruido, temperatura, etc. hasta riesgos de origen humano como la falta de cualificación o de entrenamiento, negligencias, distracciones, limitaciones físicas, cansancio, etc.

Todos estos aspectos mencionados deben quedar reflejados finalmente a la hora de elaborar las especificaciones. Aunque el contenido de cada PDS será diferente según el proyecto a llevar a cabo, el modo en que se organice la información debe ser el mismo. Así pues, se recomienda que el formato de toda especificación contenga los siguientes apartados:

- Identificación: título, designación autor y fecha.
- Numero de edición: historia de la publicación, especificaciones previas relacionadas.
- Lista de contenidos: guía de diseño.
- Prólogo: motivo y circunstancias bajo las que se presenta la especificación.
- Introducción: declaración de los objetivos.
- Ámbito de aplicación: inclusiones, exclusiones, rangos y límites.
- Definiciones: los términos específicos utilizados
- Contenido de la PDS: requisitos de funcionamiento, de fabricación, estándares de aceptación, características y disposición.
- Apéndices: ejemplos.

- Referencias: nacionales, internacionales o especificaciones internas.

No siempre son necesarios todos estos puntos. Por ejemplo, un prólogo sólo debe incluirse donde sea útil para la comprensión de las especificaciones. Pero en cualquier caso hay que procurar que la identificación de las especificaciones sea lo más completa que sea posible.

### 3.3 GENERACIÓN DE CONCEPTOS

De manera instintiva, el término creatividad se ha vinculado de manera tradicional a la creatividad artística, o más recientemente, gracias a ejemplos como los de empresas Apple o Google a la innovación en sectores tecnológicos. En este último sentido, hay que considerar la creatividad y la innovación como dos conceptos diferentes pero al mismo tiempo relacionados entre sí: mientras que la creatividad representa el proceso de generación de ideas o conceptos, la innovación es la capacidad de convertir estas ideas en algo aplicable, de darles sentido y valor dentro de un contexto.

Así, en ocasiones puede llegar a darse lo que se conoce como la “Paradoja de la Creatividad”: personas muy creativas, es decir, con gran capacidad de generar ideas, pero que son poco innovadoras o incapaces de escoger entre esas ideas las mejores y de aplicarlas de manera eficaz. Para superar esta incapaz y desarrollar el potencial creativo innato presente en todas las personas, se puede recurrir a técnicas de aplicación en diversos ámbitos, pero fundamentalmente al caso que aquí se pretende estudiar, el diseño de productos.

A continuación se describirán diversos métodos comúnmente utilizados tanto de modo individual como por grupos de personas con el objetivo de incrementar su creatividad y obtener soluciones potenciales a un problema.

#### 3.3.1 METODOLOGÍA DE GENERACIÓN DE CONCEPTOS

Una vez que se ha examinado detenidamente el problema y se han descrito las especificaciones del producto junto con las limitaciones del propio problema, la siguiente etapa en el proceso de diseño implica explorar esos límites.

La generación de ideas y su utilización en forma de innovación, sigue un proceso cuyo análisis y aplicación facilita la solución de problemas y la formulación de estrategias de cambio que permite la adaptación a una nueva situación.

El proceso creativo sigue un esquema sencillo que comprende las siguientes fases mostradas en la Figura 3.4.



**Figura 3.4.- Proceso creativo de generación de ideas**

Esta etapa de generación de ideas constituye el núcleo creativo del proceso, ya que es en esta fase en la que se producen las ideas que servirán de base para el diseño de las propuestas para aportar una solución al problema o la situación creada. El desarrollo de ideas comprende a su vez dos etapas. Una primera etapa de generación de ideas sin restricciones, de tal modo que cuantas más ideas existan, más amplio será el abanico para su posterior selección. Esto es lo que se conoce como pensamiento divergente.

La siguiente etapa, de pensamiento convergente, pretende organizar todas las ideas generadas. Para ello deben establecerse y definirse los criterios para la selección de ideas y adoptar alguna de las ideas propuestas. Esta etapa de selección de los conceptos se tratará en el siguiente apartado.

### 3.3.2 HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS DE CREATIVIDAD

Las técnicas de creatividad o de generación de ideas o conceptos, empleadas para estimular el pensamiento lateral, es decir, aquel que explora diferentes puntos de vista buscando la originalidad, pretenden ayudar a analizar el problema desde puntos de vista novedosos e inesperados con el objetivo de aportar soluciones que validen el concepto. A continuación se exponen diversas técnicas que fomentan el pensamiento creativo.

#### ➤ **BRAINSTORMING**

El *Brainstorming*, o tormenta de ideas es la técnica más conocida para la generación de ideas. Fue desarrollada por Alex Osborn, especialista en creatividad y publicidad, en los años 30 y publicada en 1963 en el libro *Applied Imagination*. Se trata de una técnica eminentemente grupal, que a grandes rasgos, consiste en anotar en una pizarra las ideas surgidas de manera no sistematizada en un grupo de personas para que después puedan discutirlos y seleccionar una de ellas.

Es una técnica básica que trata de crear un entorno propicio para que favorezca la aparición de ideas. Favorece el trabajo en equipo, lo que contribuye a reforzar la colaboración entre personas y equipos de trabajo. Gran parte de las técnicas de creatividad están basadas en ella.

La utilización de esta técnica está recomendada para resolver todo tipo de situaciones relacionadas con la necesidad de generar un gran número de ideas. El modo de funcionamiento de esta técnica consiste en:

- Previo a la reunión: se recomienda que las personas invitadas a participar sean personas predispuestas a contribuir activamente al proceso de generación de ideas. Para que esto ocurra, además, es necesario poner en conocimiento con la suficiente antelación el motivo de la reunión para que incluso lleven preparadas algunas de ideas.
- Comienzo de la reunión: centrar el objetivo de la reunión, definiendo el foco creativo del *brainstorming*. Es importante que el enunciado del problema esté en todo momento a la vista de los participantes.

- Generación grupal de ideas: ocasionalmente se puede establecer una prueba de la tormenta de ideas con un tema sencillo o simplemente pedir que los asistentes den una breve opinión inicial sobre el tema a tratar. A continuación comenzar a recoger las ideas generadas para posteriormente ordenarlas de acuerdo a temáticas o subcategorías. Es fundamental que surjan ideas, pues la base de esta técnica es generar el mayor número de propuestas posibles.
- Selección de ideas: tras dejar 5 ó 10 minutos para que los participantes lean y analicen la totalidad de las ideas propuestas se puede proceder a la toma de una decisión. Un modo de aplicación de esta técnica es que por ejemplo, cada asistente escoja cinco ideas y reparta una puntuación de 100 puntos entre ellas. Posteriormente se establecen las puntuaciones definitivas para establecer una clasificación de ideas.

Aunque para que esta técnica resulte realmente de aplicación se recomienda cuatro reglas fundamentales:

1. Las críticas están prohibidas durante la generación de ideas propiamente dicha. Todas las ideas, asociaciones de ideas e incluso ideas “absurdas” favorecen el proceso.
2. Se pretende la espontaneidad de los participantes, de tal modo que cuanto más origina sea la idea mejor.
3. Lo que interesa es la cantidad de ideas generadas sobre la calidad de las mismas. El objetivo es generar tantas ideas como sea posible.
4. Estimular la combinación y mejora de ideas, integrando las ideas para generación de otros conceptos nuevos.

Pero la tormenta de ideas también tiene algunas limitaciones. Las más importantes es que esta técnica no se puede aplicar a problemas que sólo admiten una solución, es decir, a fases de diseño muy avanzadas tales como diseño de detalle, en las que las limitaciones impuestas por todas las decisiones ya tomadas hacen la técnica poco operativa. Tampoco a varios problemas a la vez porque las ideas se repartirán solucionando sólo alguno de los problemas. En estos casos, el rendimiento de la técnica baja considerablemente. Igual ocurre si la sesión se prolonga excesivamente. Diversos

estudios demuestran que el número y la originalidad de las ideas que se proponen decrecen rápidamente después de una hora de sesión.

El número de participantes en una sesión de *brainstorming* puede ser muy variable, pero se recomienda que el número de integrantes no supere 6 personas, y que se generen al menos en torno a 70 conceptos diferentes.

Además, el director del grupo debe conocer bien la técnica, preparar la reunión, estimular la actividad cuando decaigan las ideas, y reconducir el tema cuando se desvíe del objetivo propuesto. Sólo de esta forma se conseguirá que esta técnica cumpla de manera eficaz su objetivo de generación de ideas.

### ➤ ANÁLISIS MORFOLÓGICO

Es una de las técnicas más valiosas para generar gran cantidad de ideas en un corto período de tiempo. Se desarrolló en los trabajos tecnológicos de astrofísica e investigaciones espaciales llevados a cabo en los años cuarenta, como resultado de los trabajos del astrónomo Fritz Zwicky.

Es una técnica combinatoria que consiste en descomponer un concepto o problema en sus elementos esenciales o estructuras básicas. Con sus rasgos o atributos se construye una matriz que permitirá multiplicar las relaciones entre tales partes. Así pues, en su forma básica, el Análisis Morfológico consiste en generar ideas y estructurarlas por medio de una matriz.

Esta técnica se ejecuta en cuatro fases fundamentalmente:

- Análisis del problema o idea: en primer lugar debe escogerse el problema, situación u objeto a mejorar, etc. para a continuación analizar qué atributos (o elementos, o parámetros) lo componen. Estos atributos pueden referirse a partes físicas, procesos, funciones, aspectos estéticos, etc. pero es conveniente seleccionar los atributos relevantes.
- Análisis de las variantes o alternativas posibles de cada atributo. Hay que identificar tantas maneras como sea posible la realización de cada característica o función.

- Generación de la matriz: se elabora una tabla con las características esenciales o funciones o atributos en la primera columna, y en las siguientes columnas se relacionan todas las posibles alternativas o soluciones de cada una de las funciones. A la hora de construir la matriz hay que tener en cuenta dos consideraciones: cada función o atributo ha de ser esencial e independiente del resto, y el número de funciones no puede ser elevado si se pretende que el método sea operativo.
- Identificar todas las combinaciones factibles que satisfacen todos los requisitos en su totalidad. Es decir, cuando la matriz está terminada, hay que hacer recorrido a través de los parámetros y variaciones, seleccionando uno o más de cada columna y luego combinarlos de formas completamente nuevas. Se pueden examinar todas las combinaciones de la matriz para ver la manera en que afectan al problema. Si se trabaja con una matriz que contiene diez o más parámetros, puede que sea útil examinar toda la matriz al azar, y luego ir restringiéndose gradualmente a porciones que parezcan especialmente fructíferas.

Es una técnica ampliamente utilizada para la solución de problemas de ingeniería, pero es de difícil aplicación en problemas indefinidos e ilimitados, por lo que su uso se restringe a problemas con fases claras y soluciones conocidas. Además también se distingue por su complejidad para realizarla.

### ➤ *LISTADO DE ATRIBUTOS*

El listado de atributos es una técnica de principios de la década de 1930, ideada por Crawford, que analiza un sistema o producto, lo fragmenta en partes e identifica las diferentes formas de conseguir cada parte. Gracias a esta fragmentación, se obtienen diferentes formas de cambiar, modificar o mejorar cada atributo y recombinarlos para encontrar nuevas formas del producto o sistema.

El listado de atributos es una de las mejores formas de generar ideas. Es una técnica muy útil para mejorar la calidad de productos y procedimientos de servicios complejos. Es una buena técnica si se utiliza junto con algunas otras técnicas,

especialmente el *brainstorming* (tormenta de ideas) o el análisis morfológico.

La técnica del listado de atributos suele emplearse en el departamento de Investigación y Desarrollo (I+D) de muchas compañías, especialmente en aquellas que idean constantemente productos innovadores para estar por delante de sus competidores.

Para que esta técnica funcione se recomienda llevar a cabo las siguientes etapas:

- Identificar el producto o los componentes del mismo y hacer una lista de elementos o atributos (por ejemplo, los atributos de un lápiz serían entre otros, el material del mástil, el material de la mina, dureza de la mina, anchura de la mina, calidad, color, peso, etc). Posteriormente seleccionar los atributos considerados más importantes.
- Realizar una tabla, donde se insertan los atributos como encabezamientos en la tabla. Encontrar el mayor número de variaciones de atributos posible en las columnas que hay debajo de cada encabezamiento.
- Identificar vías alternativas para conseguir cada atributo, mediante un “interrogatorio” convencional o mediante *un brainstorming*. Combinar una o más de estas vías alternativas para conseguir los atributos necesarios e intentar adoptar un nuevo enfoque para el producto o el proceso en que se está trabajando. Y finalmente analizar la viabilidad de aplicación de estas alternativas.

El listado de atributos es un método creativo para encontrar nuevas ideas para resolver problemas y dar con productos y servicios innovadores. Por tanto, este método puede combinarse con una sesión de *brainstorming* y los resultados pueden ser muy buenos. Lo importante es “olvidar” todo lo que se ha aprendido o retenido a la hora de pensar sobre una posible solución.

## ➤ ANALOGÍAS

Una analogía se define como una relación de semejanza entre cosas distintas. Desde el punto de vista de la creatividad, las analogías constituyen una técnica enfocada a la generación de ideas a partir de la creación de asociaciones de conceptos que de manera habitual no se encuentran conectados.

Los problemas se afrontan de manera indirecta, utilizando rodeos o paralelismos para encontrar soluciones a problemas existentes, resolver situaciones de estancamiento en el desarrollo de una innovación o idear nuevas aplicaciones de productos, por ejemplo. En este sentido, es recomendable utilizar esta técnica cuando se requiera de un impulso o bien las ideas no son lo suficientemente innovadoras o el proceso creativo se encuentra estancado.

El modo de funcionamiento de esta técnica consiste en:

- Definir exactamente aquello para lo se quiera obtener ideas, es decir, establecer el foco creativo.
- Determinar un campo analógico al azar. Las primeras veces que se decida utilizar esta técnica, se puede elegir uno los campos recogidos en el cuadro adjunto. Una vez que se desarrolle una cierta destreza en la aplicación de la técnica, se podrá utilizar cualquier otro que resulte del agrado de las personas implicadas en el proceso creativo.
- Reformular el foco creativo en base al campo analógico seleccionado.
- Apuntar los significados y funcionamiento propios del campo analógico.
- Encontrar y forzar el planteamiento del mayor número de paralelismos, por absurdas y retorcidas que puedan parecer las ideas.
- Analizar si las conexiones establecidas son válidas y pueden ser aplicadas, ya sea directamente o introduciendo modificaciones.

Una fuente de ideas eminentemente útil proviene de la analogía con la naturaleza. La naturaleza ha sido el desencadenante que ha ayudado a resolver problemas de muchos de las invenciones de ingeniería (por ejemplo, el método de vuelo del murciélago, que emite un sonido agudo que rebota contra los obstáculos y advertir su posición, es la base del sonar).

Esta técnica se basa más en intentar aprovechar las características y/o soluciones adoptadas con anterioridad en un determinado objeto, para aplicarlas al diseño a realizar.

## ➤ SEIS SOMBREROS

Este método se le atribuye al Doctor Bono a principios de los años 80. Se fundamenta en discriminar el pensamiento, mediante el uso de estas seis maneras de pensar asociadas a la acción de ponerse un sombrero de un color u otro. Cada uno de los colores implica un tipo de pensamiento en función de las tareas o necesidades correspondientes según los objetivos planteados. Es decir, los seis sombreros simbolizan los diferentes puntos de vista desde los que se puede analizar un problema o una situación concreta. Se trata de que los participantes en una reunión aporten ideas y colaboren en el proceso de adopción de decisiones, para lo cual todas las personas integrantes del grupo creativo utilizarán a la vez cada sombrero (imaginario) o punto de vista para analizar una situación o problema, puesto que la observación de los problemas desde diferentes puntos de vista enriquece el resultado del debate al aprovechar las capacidades y la creatividad de los participantes para analizar de forma exhaustiva los pros y los contras del asunto tratado.

Las personas participantes en una reunión van usando sombreros uno detrás de otro. Cada sombrero será de un color diferente, y cada color representa una visión. Todos los miembros del grupo utilizan de manera conjunta uno de los sombreros ofreciendo ideas basadas en la visión relacionada con cada sombrero respectivo. La relación entre colores y sombreros es la siguiente:

- Sombrero Blanco: Presentación de información de manera objetiva y neutral.
- Sombrero Rojo: Se expresan las opiniones, intuiciones y sentimientos, sin necesidad de fundamentar las respuestas en argumentos sólidos.
- Sombrero Amarillo: Los miembros señalan los aspectos positivos del asunto o idea. Se trata de identificar las posturas favorables.
- Sombrero Negro: Este sombrero representa la cautela a la hora de analizar la cuestión. En esta fase se señalan los posibles riesgos y obstáculos.

- Sombrero Verde: En esta fase se da rienda suelta al pensamiento creativo. Se plantean las ideas nuevas y de las posibles alternativas que incorporan más valor a la cuestión debatida.
- Sombrero Azul: Ofrece una visión general del tema. Sintetiza el debate, valorando y ponderando las diferentes alternativas propuestas.

Se recomienda que los sombreros de cada color sean utilizados al mismo tiempo por el conjunto de participantes. Además, se aconseja empezar por el blanco y terminar por el azul, sin embargo no es necesario ni existe un orden establecido para cada sombrero, y se recomienda no utilizar el sombrero negro tras el verde.

Los seis sombreros es una técnica muy potente que resulta propicia para la toma de decisiones. Está diseñada para guiar debates y evitar que los participantes desvíen su atención centrándose en la propia discusión.

#### ➤ *OTRAS TÉCNICAS*

Además de las técnicas anteriores, existe todo un abanico de técnicas que, aunque se expondrán brevemente, por su eficacia y popularidad de uso merece la pena destacar.

##### ❖ 4 x 4 x 4

Es una técnica en grupo que sirve para seleccionar ideas en la que cada individuo aporta 4 ideas. Se hacen grupos de 2 personas y se eligen 4 ideas. Posteriormente se hacen nuevos grupos de 4 y se eligen otras 4. Finalmente el grupo elige una idea.

##### ❖ Biónica

Tiene un funcionamiento similar al de las analogías. Se utiliza habitualmente en el ámbito tecnológico para desarrollar nuevos instrumentos inspirados en la naturaleza y en los seres vivos.

##### ❖ Defectología

Se elabora un listado de los defectos o de los aspectos mejorables de un producto. Una vez identificados estos elementos, se plantean posibles soluciones para

---

mejorarlo. Cada propuesta constituye una idea de mejora.

❖ Inversión

Consiste en darle la vuelta al problema o foco creativo. Se altera el sentido del planteamiento para dar respuesta a una situación concreta, provocando de esta manera la generación de ideas. Por ejemplo, si un bar está vacío, pensar cómo se puede vaciar un establecimiento lleno: Subiendo la música, poniendo las bebidas calientes, dando un mal servicio. La solución vendría de poner una música agradable, cuidar la presentación de las bebidas y contratar un camarero especialmente amable.

❖ Relaciones forzadas

La combinación de lo desconocido es una manera para forzar la aparición de nuevas ideas rompedoras que se traduzcan en innovaciones radicales. Se trata de buscar una palabra o concepto al azar (por ejemplo, abriendo el diccionario por cualquier página y eligiendo una palabra cualesquiera) y se trata de buscar aplicaciones para nuestro producto o empresa.

### 3.4 SELECCIÓN DE CONCEPTOS

En los anteriores apartados se definieron las especificaciones del producto y, a partir de ellas, se generaron una serie de conceptos para el proceso de diseño. Como se mencionó, la generación de ideas se puede considerar como una etapa divergente en el sentido en que se analizan todas las limitaciones propias de las especificaciones hechas. Sin embargo, la etapa de selección de esos conceptos se trata de una etapa eminentemente convergente, lo cual implica reorganizar los conceptos para reducir la lista de conceptos generados a no más de dos o tres que serán los que se emplearán para futuros análisis más detallados.

La selección de los mejores conceptos en lo que al producto a diseñar se refiere, es una de las cuestiones más críticas y difíciles que se deben tomar durante el proceso de diseño. Es fundamental llevar a cabo esta etapa ya que permite evitar la pérdida de tiempo en la búsqueda de alternativas equivocadas durante la etapa de diseño de detalle y estimula la combinación propia de conceptos. Una elección inadecuada raramente puede ser compensada en posteriores fases sin que ello suponga un incremento

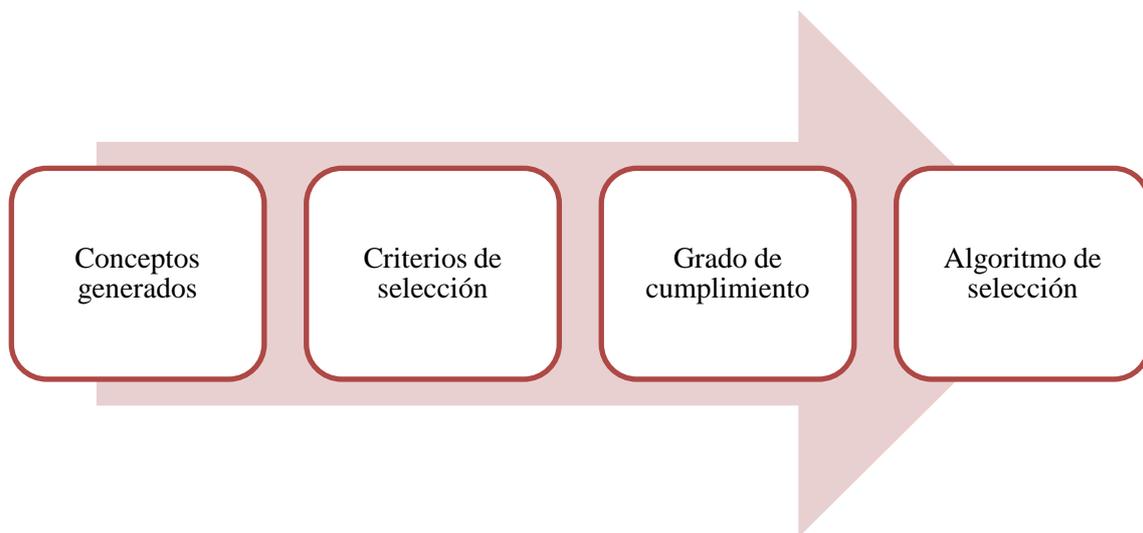
considerable de rediseño.

Para evitar esto en la medida de lo posible existen métodos que permiten evaluar y seleccionar conceptos relativos al producto con el objetivo de reforzar y reducir el riesgo de fracaso del proceso.

### 3.4.1 METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE CONCEPTOS

Seleccionar el concepto a diseñar en detalle es una de las cuestiones más críticas y difíciles que debe tomar el equipo encargado del diseño. Lo normal es que tenga que decidir cuál de las propuestas de diseños conceptuales cumple mejor con los criterios de selección.

Para ayudar a la toma de decisión existen múltiples técnicas, caracterizadas en general por constar por cuatro fases diferenciadas como se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5.- Proceso de selección de conceptos**

El primer paso consiste en listar los conceptos a evaluar, el segundo en elegir los criterios de selección, el tercer paso es evaluar el grado de cumplimiento de cada concepto respecto de cada criterio de selección y finalmente, mediante un algoritmo de selección se determina el mejor concepto.

### 3.4.2 HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS DE SELECCIÓN DE CONCEPTOS

A continuación se expondrán los diferentes métodos empleados, desde los más

básicos como los criterios de clasificación y de ponderación, hasta otros de mayor complejidad, como el método Datum o el EVAD.

### ➤ **TOMA DE DECISIONES SUBJETIVA**

Esta técnica consiste en rellenar una tabla, colocando, en el eje horizontal los conceptos generados (o soluciones) y en el eje vertical los objetivos (o criterios). Luego se va rellenando las casillas de la tabla con una evaluación subjetiva de la capacidad de cada concepto para cumplir con el objetivo individual, para lo cual se emplean adjetivos tales como excelente/pobre, alto/bajo, bueno/malo, moderado, etc.

En la Tabla 3.1 se puede ver la estructura común de la matriz generada con esta técnica.

En ocasiones, profesionales con amplia experiencia en el sector del diseño, en lugar de sopesar todos los factores, seleccionan los conceptos por intuición, sin recurrir a un procedimiento formal. Sin embargo, esta tendencia es un error, incluso cuando se trata de problemas relativamente sencillos. Así, la adopción de un proceso sistemático de toma de decisiones es esencial tanto para personal con poca experiencia, como profesionales en dicha temática.

Criterios	Soluciones				
	A	B	C	D	E
1.	Excelente	Bajo	Moderado	Pobre	Alto
2.	Moderado	Bajo	Alto	Excelente	Bajo
3.	...	...	...	...	...

**Tabla 3.1.- Matriz para la toma de decisiones subjetiva**

La toma de decisiones en el proceso de diseño es similar a un proceso de filtrado de información, de manera que la lista original de posibles conceptos se vaya reduciendo a un número de conceptos manejables. Este filtrado puede ser más grosero, mediante cálculos básicos para establecer la inviabilidad, o de carácter más detallado

mediante estudios exhaustivos. Por lo general, cuando se realizan estudios más rigurosos para la toma de decisiones, conduce a adoptar mejores soluciones en los problemas de diseño. Además, los mejores resultados se consiguen cuando la toma de decisiones es grupal, incluso involucrando al cliente cuando sea necesario, y no individual.

En cualquier caso, independientemente del tipo de metodología a llevar a cabo, siempre es preferible que una toma de decisiones por simple intuición.

### ➤ *CLASIFICACIÓN DE CRITERIOS*

En todo procedimiento formal de selección de conceptos, el primer paso consiste en clasificar los criterios escogidos de las especificaciones en orden de importancia relativa.

La mayoría de estos métodos basados en clasificación de criterios implican la formación de una matriz de dominio binario, tal como propuso Pugh. En este método se forma una matriz, con los criterios enfrentados en los ejes vertical y horizontal, como muestra la Tabla 3.2.

Luego se va rellenando con 1 ó 0 en cada casilla de la matriz dependiendo de la importancia relativa del par de criterios. Posteriores modificaciones del método sugieren, en caso de que los criterios se consideren de igual importancia, asignar un valor de 0,5 a cada uno. Sin embargo, hay quien opina que esta tendencia puede restar efectividad al método, pues se tendería a asignar valores predominantemente de 0,5 ante la duda, haciendo que el proceso tenga menor valor.

El procedimiento utilizado en este caso consiste en considerar cada fila, de tal manera que si el criterio en dicho eje se considera más importante que el criterio con el que se compara en el eje vertical, se asigna un valor de 1. Conviene hacer cada comparación dos veces, por encima y por debajo de la diagonal, para que las decisiones tomadas en la segunda vuelta sean una manera de control y confirmación de los valores asociados a cada criterio.

Criterios	Criterios						
	1.	2.	3.	4.	5.	Total	Clasificación
1.	/	1	1	1	1	4	1°
2.	0	/	0	1	1	2	3°
3.	0	1	/	1	1	3	2°
4.	0	0	0	/	0	0	5°
5.	0	0	0	1	/	1	4°
						10	

**Tabla 3.2.- Matriz de clasificación de criterios**

En este sentido, en una matriz de este tipo un modo de comprobación para verificar que no haya contradicciones es que al hacer la segunda vuelta, el número total debe ser igual a:

$$0,5 n (n - 1)$$

siendo n el número de criterios. Es decir, en un supuesto de 5 criterios a estudiar, deben resultar un total de 10 asignaciones, que resultaría del mismo modo de la adición de los valores asignados al total de columnas.

Una vez realizados todos los pares de comparaciones, los totales de filas indican la posición o importancia o jerarquía de los criterios. La siguiente etapa del proceso de la toma de decisiones consiste en asignar valores que representen el valor relativo de cada criterio.

### ➤ PONDERACIÓN DE CRITERIOS

El procedimiento de ponderación pasa por reordenar los criterios, colocando en primer lugar el más importante. Con esta reordenación se asegura que los criterios que tienen mayor influencia en la selección de conceptos, se consideren primero. Esto es

especialmente importante cuando se consideran muchos criterios lo que implica tomar gran cantidad de decisiones.

El método, como se muestra en la Tabla 3.3 consiste en asignar a cada criterio un factor de ponderación normalizado dividiendo el número total de decisiones tomadas (por ejemplo, tomando como base una matriz de clasificación) entre los totales individuales. La suma de todos los factores de ponderación debe ser igual a 1.

Criterios	Total	Clasificación	Ponderación
1.	4	1°	0,40
2.	2	3°	0,20
3.	3	2°	0,30
4.	0	5°	0
5.	1	4°	0,10
	10		1,00

**Tabla 3.3.- Matriz de ponderación de criterios**

Por otra parte el modo en que se realiza la ponderación de cada criterio está abierto al debate. Hay quien sugiere que no es del todo recomendable que la selección se haga en base a operaciones aritméticas. En cualquier caso, es necesario que exista algún método que ayude a la selección de los conceptos de la mejor manera posible,

Un método quizás más riguroso de la asignación de ponderaciones es utilizar un árbol de decisión. El árbol de decisión es un método de presentación de la toma de decisiones de manera estructurada y objetiva, aunque la técnica se suele aplicar más comúnmente en la gestión de proyectos.

### ➤ **MÉTODO DATUM**

El Método Datum es un método para evaluar las alternativas de diseño. Se basa en la utilización de una matriz que enfrenta los conceptos en un eje, frente a los criterios

u objetivos en el otro, siendo esto últimos un modo de expresión básico de las especificaciones. Es decir, mediante una matriz de comparación y evaluación de conceptos, se comparan las distintas soluciones generadas frente a los criterios de evaluación. Un ejemplo de matriz de este tipo se muestra en la Tabla 3.4.

Criterios	Soluciones				
	A	B	C	D	E
1.	D	+	-	s	+
2.	A	-	+	-	s
3.	T	s	+	-	-
4.	U	...	...	...	...
5.	M	...	...	...	...

**Tabla 3.4.- Matriz Datum para selección de conceptos**

Se selecciona una de las soluciones como referencia y se va considerando cada concepto o solución respecto a él, con cada uno de los criterios, estableciendo tres categorías: mejor que (+), igual que (s), y peor que (-). Posteriormente se repite el proceso pero modificando el concepto tomado como referencia o datum. Una vez que se ha hecho la comparación, se analiza para cada concepto, lo que permitirá tomar decisiones.

Por ello, tiene la ventaja de apoyar las decisiones en el análisis sistemático de los criterios a través del estudio de las ventajas y desventajas de las alternativas, pero presenta el inconveniente que el hecho de establecer comparaciones de manera sucesiva (para cada concepto de referencia tomado) consume tiempo. Además, aunque el método propiamente no lo establece, o recomendable sería establecer una escala acotada para indicar en qué medida cada concepto es mejor o peor que el tomado como referencia, tal como una escala acotada para valorar el grado de cumplimiento, por ejemplo, tomando valores entre 1 y 5 siendo el 1 muy poco y el 5 el valor óptimo.

➤ **EVAD**

El método de selección EVAD fue desarrollado por la Universidad de Twente, y se trata de un método especialmente recomendado para la evaluación y selección de ideas en torno al diseño de nuevos productos, aunque es aplicable para la selección de conceptos. El objetivo de este método es apoyar al diseñador durante la selección de conceptos al tiempo que conserva un cierto aspecto intuitivo.

Al igual que para el resto de los métodos propuestos, primero es necesario reducir la lista de todos los conceptos o soluciones generadas a un número manejable. En este sentido, el método recomienda ayudarse de las especificaciones a la hora de establecer los criterios a reducir. En la Tabla 3.5 se muestra el formato típico que se emplea para este tipo de técnica.

Criterios	Soluciones															
	A				B				C				D			
	--	-	+	++	--	-	+	++	--	-	+	++	--	-	+	++
1.			X			X				X				X		
2.			X			X		X						X		
3.				X	X							X			X	

**Tabla 3.5.- Matriz EVAD para selección de conceptos**

Posteriormente, los conceptos se someten a un procedimiento formal de evaluación, de acuerdo a la metodología de Harris. Este método consiste en listar los criterios de evaluación, teniendo en cuenta que estos criterios estén estandarizados en la medida de lo posible según los objetivos estratégicos de la empresa. Por ejemplo, suponiendo una empresa donde uno de los criterios sea la imagen del producto, podría tener normas establecidas de exclusividad (++) , ordinario (+) , tradicional (-) o anticuado (--). De las descripciones de los conceptos se establecen las puntuaciones de cada criterio. Estos resultados se introducen en un diagrama donde se evalúa cada idea de

---

manera más cualitativa que cuantitativa.

Por tanto, este método se debe llevar a cabo a través de las siguientes etapas:

- Reducción de una lista inicial de conceptos a no más de seis o siete conceptos.
- Estandarización de los criterios establecidos en el pliego de condiciones.
- Para cada concepto o solución hacer un diagrama, donde los criterios conformen el eje vertical y los conceptos el eje horizontal. Para cada concepto o solución establecer cuatro columnas desde (--) a (++).
- En base a los estándares establecidos se van tomando decisiones para cada concepto contra cada criterio. Se va estudiando cada solución con cada criterio, decidiendo en qué medida esa solución cumple en mejor o peor medida cada criterio seleccionando desde que no lo cumple (--) hasta que lo cumple a la perfección (++).

Sin embargo, como ya se indicó, esta metodología pretende más ser una representación visual que proporcionar una evaluación cuantitativa de las diferentes alternativas en lo relativo a conceptos. Hay que ser conscientes que debe emplearse en cierto modo la intuición y que los criterios no son ponderados de ningún modo, siendo la puntuación mayormente subjetiva.

### 3.5 DESARROLLO DE CONCEPTOS

Una vez seleccionados los conceptos es necesario llevar a cabo una etapa de análisis más detallado que cubra aspectos relacionados, entre otros, con la forma del diseño, o el modo de fabricación y montaje del producto a diseñar.

Esta etapa constituye el nexo de unión entre la etapa de desarrollo conceptual y la etapa de diseño detallado. El modo de desarrollar esta etapa es elaborando, en base a las especificaciones de diseño, dibujos y documentación de interés, el diseño del producto para una fase posterior de análisis más detallado.

Hay que tener en cuenta que aunque las representaciones en 3D siempre son útiles, realmente hasta la etapa de diseño detallado no se considera estrictamente esencial. El objetivo en esta etapa es ayudar a comprender cómo funcionará el sistema

---

una vez se han seleccionado los conceptos, por lo que previamente a la realización de los modelos mediante aplicaciones informáticas, se hace necesario comenzar estableciendo bocetos simples que plasmen los aspectos a desarrollar más detenidamente en fases posteriores.

Todo proyecto de diseño de un producto contiene la documentación final respecto al diseño final del diseño. Sin embargo, para llegar al desarrollo el producto final, previamente es necesaria la elaboración de bocetos iniciales que contienen información valiosa sobre la intención de diseño y que, por lo general, se infravaloran y desechan. Estos bocetos durante el proceso de diseño son importantes en la medida en que ayuda a comunicar de manera más directa la idea sobre un concepto. Para que sea efectivo debe:

- Ilustrar la forma del producto.
- Contener notas explicativas pertinentes, con los datos relevantes que sean de utilidad para la ejecución del proyecto.
- Debe mostrar las dimensiones generales.
- Estipular el material con el que se va a construir la pieza o bien, determinar el acabado superficial que tendrá.
- Deben estar jerarquizados y codificados por orden de generación

En base a esto, a continuación, se expondrán algunos de los aspectos fundamentales a considerar en la elaboración de dichos bocetos:

### ➤ **TAMAÑO Y RESISTENCIA**

Hay que identificar las funciones y limitaciones incluidas dentro de las especificaciones que determinan aspectos como el tamaño total y las fuerzas a soportar. Hay factores que influyen en el tamaño y la resistencia, como el peso y el tamaño, incluido el del operario, máximas frecuencias de vibración, factores requeridos de seguridad, etc.

En cualquier caso los dibujos deben incluir todos los parámetros conocidos hasta el momento, con las decisiones que hayan sido tomadas así como tolerancias, debiendo actualizarse a medida que se va incorporando más información o de mayor nivel de

detalle.

### ➤ *FORMA DEL DISEÑO*

Hay muchos factores que deben considerarse a la hora de definir la forma de los componentes y estructuras del diseño. Un error común es diseñar los componentes sin prestar atención al proceso de manufactura que se empleará. En este sentido, hay que tener en cuenta que el proceso de manufactura que se vaya a seleccionar estará muy influenciado por la cantidad a fabricar. Otro aspecto fundamental en cuanto a la forma que vayan a adoptar los componentes, y en especial, la estructura, son las cargas a soportar por la estructura. En todo caso, es recomendable:

- Identificar el método de manufactura óptimo.
- Identificar la distribución de fuerzas y situar los componentes de manera que la distribución de tensiones debidas a las cargas ejercidas sea lo más óptimo posible.
- Prestar especial atención al tamaño de los componentes a emplear.

Además, relacionado con la forma de diseñar los productos, operaciones y en general ambientes de trabajo, hay que considerar la ergonomía, para que coincida en la medida de lo posible con las capacidades y limitaciones humanas. Además, aunque ciertamente tenga que ver más con fines comerciales, el aspecto estético del producto es otro concepto a considerar en el proceso de diseño: simplicidad, líneas limpias y buenas proporciones es algo a lo que debe aspirar el diseñador de un nuevo producto.

### ➤ *DISEÑO SEGÚN ENSAMBLAJE Y MANUFACTURACIÓN*

Todo proceso de diseño implica tener conocimiento sobre los métodos de fabricación, puesto que en caso contrario puede derivar en posibles interferencias entre los componentes, o incoherencias durante el proceso de montaje. Un diseño debería ser fácil de ensamblar y montar, por lo que deben tenerse en cuenta los siguientes conceptos:

- Facilidad de manejar.
- Económico.

- Emplear maquinaria y herramientas existentes.
- Accesibilidad.
- Fácil de ensamblar.

Uno de los objetivos durante la etapa de realización debería ser optimizar el número de componentes. Desde el punto de vista del ensamblaje, debe escogerse el menor número de componentes. Sin embargo, reducir el número de componentes puede implicar el incremento de la complejidad de manufactura de dichos componentes.

### 3.6 MODELIZACIÓN

Dependiendo del objetivo inicial y de las limitaciones de coste y tiempo, el proceso de diseño puede concluir en una máquina definitiva, o bien, en un prototipo parcial. Para el primer caso, se deben emplear modelos de cálculo con el fin de minimizar el riesgo de fallo del sistema, o en su defecto, emplear factores de seguridad elevados de acuerdo a la aplicación, a pesar de que ello implique por lo general, un aumento del coste.

Lo ideal en un proceso de diseño es la construcción de un prototipo para la realización de pruebas, con el fin de validar los modelos de cálculo, comprobar la resistencia y durabilidad de la máquina y detectar y corregir defectos. Sin embargo, hay que ser conscientes que la realización de estos prototipos a tamaño completo puede implicar el retraso del lanzamiento del producto si no se ha planificado adecuadamente. Además, hay muchos casos en los que la fabricación de modelos a escala real durante el diseño es prácticamente imposible.

Por ello, en muchas ocasiones, el modelo se realiza mediante representaciones asistidas por ordenador y modelos matemáticos que permiten realizar análisis de esfuerzos, deformaciones y fatiga, ahorrando dinero representado en tiempo, materiales y costes de fabricación.

#### 3.6.1 HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS DE MODELIZACIÓN

Existen diferentes mecanismos de modelización empleados en el diseño de productos y que se verán detenidamente a continuación.

Los modelos matemáticos, donde se resuelven ecuaciones en función de una serie de asunciones hechas para la simplificación del problema, y que concluye con la optimización del mismo. El tercer método consiste en la representación en dos y tres dimensiones, elaborando modelos a escala del dispositivo, y por último, los métodos de simulación mediante análisis de elementos finitos.

### ➤ *MODELIZACIÓN MATEMÁTICA*

Para la resolución de problemas lo común es el empleo de modelos matemáticos, que, basados en una serie de ecuaciones, representen el problema real.

En las etapas iniciales del diseño de productos, los cálculos que se realizan son de índole global, con análisis generales y simplificaciones con el objetivo de explicar los principios básicos. Hay que reemplazar la realidad por un modelo simplificado. A medida que continúa el proceso de diseño, y se van añadiendo más detalles y especificaciones, conviene ir reduciendo el número de supuestos para realizar cálculos más precisos. Los modelos más realistas se forman con unas pocas hipótesis hasta alcanzar un modelo que esté próximo a la situación real.

Por tanto es fundamental tanto definir el modelo con los supuestos, así como los modos potenciales de fallo, de cara a obtener la mejor solución posible. Además, hay que tener en cuenta, que hay ocasiones en que la forma u otros aspectos del modelo deben cumplir una serie de requisitos exigibles de acuerdo a la normativa o la legislación vigente (caso por ejemplo, de componentes industriales).

Con todo ello, en el proceso de diseño hay que asegurar la estabilidad del producto a través de la identificación de los posibles modos de fallo, tales como la deformación elástica, fatiga, corrosión, oxidación, etc. Así, en todo proceso de modelización se recomienda seguir cuatro etapas:

- Dibujar tres diagramas separados, de geometría, fuerzas aplicadas y momentos, y de fuerzas resultantes y momentos en la sección crítica.
- Definir todas las simplificaciones

- Desarrollar las ecuaciones matemáticas para las fuerzas resultantes y los momentos en la sección crítica en términos de carga aplicada y la geometría.
- Definir el criterio asumido de fallo.

Este procedimiento debe repetirse de manera iterativa hasta identificar el caso más desfavorable de fallo.

En cualquier caso siempre hay que ser conscientes que el resultado de un modelo asistido por ordenador simplemente es la respuesta a una ecuación, no la solución del problema.

### ➤ *OPTIMIZACIÓN*

En los problemas de diseño, en muchas ocasiones ocurre que los requisitos resultan contradictorios entre sí. Por ello, a la hora de buscar la mejor solución posible hay que considerar y definir la interacción entre todas las variables que afectan al problema.

En este sentido, la optimización consiste en determinar la mejor alternativa que tiene la propiedad de ser la mejor respecto a cualquier otra, es decir, consiste en encontrar la mejor solución de modelos de decisiones difíciles frente a múltiples soluciones globales.

Un problema de optimización general implica tres tipos de relaciones funcionales entre las especificaciones y parámetros de diseño:

- Función objetivo: es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar.
- Variables: representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo.
- Restricciones: representan el conjunto de relaciones que las variables están obligadas a cumplir.

La resolución pasa por encontrar las variables que optimizan la función objetivo y satisface todas las restricciones.

Existen múltiples métodos de optimización, como se muestran en la Tabla 3.6.

Como es obvio, no es posible ni es el objetivo del presente Trabajo Fin de Máster abordar la amplia variedad de métodos a aplicar. No obstante es importante mencionar los diferentes métodos existentes de optimización puesto que el diseño de un nuevo producto, siempre requiere el análisis y búsqueda de la solución óptima.

Técnicas de programación matemática	Técnicas de procesos estocásticos	Métodos estadísticos
Métodos de calculo Cálculos de variaciones Programación no lineal Programación geométrica Programación cuadrática Programación lineal Programación dinámica Programación de variables enteras. Programación estocástica Programación Separable Programación de funciones multiobjetivo Métodos de redes: PERT y CPM Teoría de juegos <i>Simulated annealing</i> Algoritmos genéticos Redes neuronales	Teoría de decisión estadística Procesos de Markov <i>Queueing theory</i> Teoría renovable Métodos de simulación Teoría de fiabilidad	Análisis de regresión <i>Cluster análisis, pattern recognition</i> Experimentos de diseño Análisis Discriminante

Tabla 3.6.- Clasificación general de las Técnicas de Optimización

Así pues, destacan los métodos de programación lineal y cálculo diferencial:

- **Programación lineal:** la programación lineal resuelve problemas donde todas las relaciones entre las variables son lineales, tanto en las restricciones como en la función objetivo, la presencia de una única función no lineal hace que el problema no pueda clasificarse como problema de programación lineal. Se aplica en diversos campos, como la

ingeniería, la economía, la gestión, y muchas otras áreas de la ciencia, la técnica y la industria.

El objeto de la programación lineal es optimizar (minimizar o maximizar) una función lineal de  $n$  variables sujeto a restricciones lineales de igualdad o desigualdad, denominada función objetivo. Un problema de programación lineal consiste en encontrar el óptimo (máximo o mínimo) de una función lineal según un conjunto de datos, variables y restricciones.

- **Cálculo diferencial:** consiste en el estudio del cambio de las variables dependientes cuando cambian las variables independientes de las funciones. El principal objeto de estudio en el cálculo diferencial es la derivada. En una gran cantidad de procesos donde se relacionan dos o más variables, frecuentemente el cambio en una de ellas induce un cambio en el valor de las otras. La derivada permite tanto determinar cómo predecir el comportamiento de las diversas variables involucradas en un fenómeno.

Una de las aplicaciones del cálculo diferencial es resolver problemas de optimización utilizando el criterio de primera derivada, para hallar los valores críticos, es decir, los extremos de la función, también conocidos como máximos y mínimos.

Existe una serie de paquetes de software para resolver problemas de optimización. Por ejemplo LINDO o WinQSB resuelven modelos de programas lineales y LINGO, What'sBest! y MATLAB™ resuelven problemas lineales y no lineales.

### ➤ *MODELOS A ESCALA*

A menudo la etapa más difícil en el proceso de diseño en ingeniería implica la verificación del comportamiento más probable que tendrá el diseño antes de valorar los detalles del diseño propiamente dicho.

Está claro que los modelos matemáticos vistos con anterioridad constituyen un primer paso importante, pero igualmente hay que considerar y valorar el desarrollo de modelos o representaciones en tres dimensiones a escala, e incluso la elaboración de

prototipos para establecer varios tipos de datos experimentales, tales como deflexiones, resistencia, coeficientes y características de las vibraciones. El problema de estos últimos es que, a pesar de sus múltiples ventajas al permitir reproducir u verificar de modo realista el dispositivo, añaden costes debidos a la fabricación, por lo que a la hora de valorar llevar a cabo esta etapa hay que considerar la finalidad del producto y el nivel de importancia que puede tener la realización de maquetas a escala real.

Por ello, lo habitual es el empleo de sistemas CAD, introducidos hace tres décadas, como una herramienta indispensable en las áreas de ingeniería. AUTOCAD es un software ampliamente conocido para el diseño de herramientas y maquinaria y en la elaboración y diseño de todo tipo de edificios, desde pequeños tipos residenciales para las estructuras comerciales e industriales más grandes (hospitales y fábricas).

Se utiliza principalmente para la ingeniería de detalle de modelos 3D y planos 2D de componentes físicos, pero también se utiliza en todo el proceso de ingeniería de diseño conceptual y diseño de productos, a través del análisis dinámico para la definición de métodos de componentes de fabricación.

Aunque AUTOCAD probablemente sea el más conocido, existen otros programas de representación gráfica a escala asistidos por ordenador, como SolidEdge, SolidWorks, o Rhinoceros. En cualquier caso, bien sea uno u otro programa, es fundamental su empleo cuando se trata es del diseño de productos.

### ➤ *ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS*

El Análisis de Elementos Finitos (FEA) consiste en el modelado de productos y sistemas en un entorno virtual, con el propósito de encontrar y resolver potenciales (o actuales) problemas estructurales o de rendimiento. FEA es la aplicación práctica del Método de Elementos Finitos (FEM), utilizado por ingenieros y científicos para matemáticamente modelar y resolver numéricamente, entre otros, problemas de complejas estructuras, fluidos y de física, haciendo que sea utilizado en una amplia gama de industrias, pero es más comúnmente utilizado en las industrias aeronáutica, biomecánica y de automoción.

La base de este análisis consiste en considerar los modelos de elementos finitos

conformados por un sistema de puntos, llamados *nodos*, que constituyen la forma del diseño. Conectados a estos nodos están los mismos elementos finitos que forman la malla de elementos finitos y contienen el material y las propiedades estructurales del modelo, la definición de cómo va a reaccionar a ciertas condiciones. La densidad de la malla de los elementos finitos puede variar a través del material, en función del cambio esperado en los niveles de estrés de un área en particular. Cuando existen partes que experimentan grandes cambios de tensiones, por lo general se requiere una densidad de malla superior a aquellos en los que la variación supone poco o ningún esfuerzo.

Los modelos pueden ser creados usando elementos en una dimensión, dos dimensiones o tridimensionales. Cada combinación de modelos requiere una diversa gama de propiedades que lo definen como: áreas de la sección, momentos de inercia, torsión constante, resistencia a la flexión, etc. Para simular los efectos de los entornos reales de trabajo en la FEA, se puede aplicar los distintos tipos de carga al modelo de elementos finitos.

El resultado, es que este análisis permite obtener resultados por ejemplo, del desplazamiento de los nodos, fuerzas elementales deformaciones y tensiones.

Por tanto, el FEA puede ser utilizado en el diseño de nuevos productos, o para refinar un producto ya existente, para asegurar que el diseño será capaz de realizar las especificaciones antes de la fabricación, permitiendo:

- Predecir y mejorar el rendimiento y fiabilidad del producto
- Reducir la creación de prototipos físicos y pruebas
- Evaluar los diferentes diseños y materiales
- Optimizar el diseño y reducir el uso de materiales

Algunos ejemplos de aplicaciones de software FEA son Solid Edge Simulation, Parasolid, NX Nastran, Femap o Flac Itasca Group.

### 3.7 DISEÑO DE DETALLE

Una vez desarrollados los conceptos fundamentales, en la siguiente etapa se deben considerar los componentes individuales y asegurarse que el diseño y la selección de los mismos se han optimizado. Durante el proceso de diseño de detalle se verifica el

diseño y se selecciona cada componente para que permita pasar al proceso de fabricación. Por ello, el resultado de esta etapa debe ser una descripción detallada, con dibujos esquemáticos acompañados de documentación técnica.

### 3.7.1 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE DETALLE

En esta etapa, diferentes grupos de profesionales y departamentos de la organización de diferentes disciplinas trabajan activamente en procesos de síntesis y análisis de las soluciones, realizando evaluaciones de componentes para validar los requerimientos establecidos previamente, especificando aquellos que hasta el momento habían permanecido indefinidos y estimando los efectos de los distintos componentes en el sistema.

El proceso de diseño de detalle se muestra en la Figura 3.6. Como muchas otras etapas, se trata de un proceso cíclico e iterativo, siguiendo el patrón indicado en la figura.

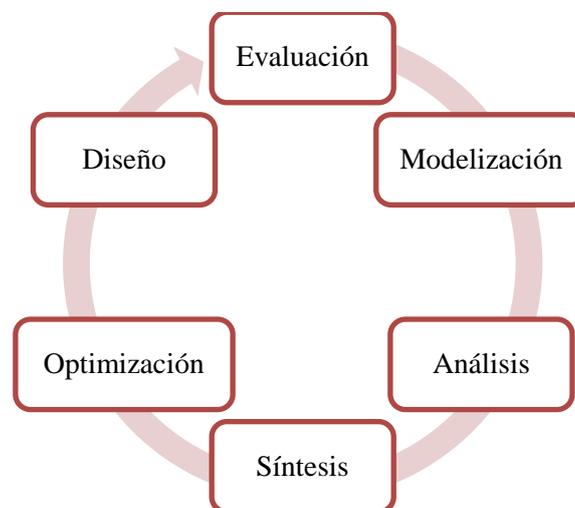


Figura 3.6.- Naturaleza cíclica del proceso de diseño de detalle

Las especificaciones son, en general, planos con detalles de terminación, con medidas y datos de cada parte. Para los componentes y demás elementos dedicados del sistema se realizan los planos de detalle, que especifican las dimensiones necesarias, los materiales de construcción, técnicas de ensamblaje, requerimientos para su ensayo, etc. Los planos de detalle deben incluir toda la información necesaria para producir y verificar el componente; además deben mostrarse las vistas de las piezas que serán

necesarias para la manufactura.

### 3.7.2 HERRAMIENTAS Y TÉCNICAS EN EL DISEÑO DE DETALLE

En líneas generales, el propósito u objetivo fundamental de esta etapa del proyecto consiste en:

- seleccionar los circuitos,
- establecer modelos para el cálculo de los elementos, a fin de determinar la carga a la que se ven sometidos,
- seleccionar los componentes estándar en función de la carga a la que están sometidos, indicando fabricante y número de parte correspondiente,
- establecer las especificaciones que deben ser satisfechas por los componente a medida,
- realizar análisis de valor de cada elemento,
- documentar los problemas detectados en las etapas de verificación, y las acciones de corrección correspondientes,
- documentar los resultados de los ensayos de validación efectuados sobre prototipos,
- generar la documentación y las especificaciones que describan completamente el diseño, etc.

Para ello se recomienda realizar una primera definición de aspectos tales como geometría y materiales empleados, o los acabados, para a continuación, pasar a simplificar las soluciones adoptadas, integrar y revisar el proyecto para asegurar que se adecua en todo momento a los objetivos iniciales que se habían fijado.

#### ➤ DESCRIPCIÓN DETALLADA

- Geometría y materiales empleados: La primera tarea del diseño de detalle es completar la determinación de cada pieza y componente en todos los detalles que hacen posible su fabricación, entre ellos:
  - *Formas y dimensiones*. El diseño de materialización fija las principales formas y dimensiones de piezas y componentes a partir de

cálculos, simulaciones y otras consideraciones funcionales. El diseño de detalle fija el resto de formas y dimensiones para completar la definición de las piezas (criterios: facilidad de fabricación y montaje, optimización del espacio, del peso o del coste).

- *Tolerancias.* Durante el diseño de detalle corresponde determinar las cadenas de cotas que cubren las distintas funciones esenciales para el buen funcionamiento del sistema. Las tolerancias se indican en los distintos planos de pieza.
- *Determinación de materiales y procesos.* El diseño de materialización fija los materiales de las piezas y componentes de más responsabilidad y establece indicaciones genéricas (acero, aluminio, plástico) en los mismos.

Los planos de pieza (con independencia de su responsabilidad) deben indicar de forma precisa el material y, cuando convenga, dar indicaciones sobre procesos de fabricación (especialmente los tratamientos térmicos y superficiales).

- Definición de acabados:
  - Recubrimientos. Hay varios motivos para recubrir las piezas (a menudo, un recubrimiento realiza más de una función):
    - Estéticos (pinturas, anodizado, niquelado).
    - Evitar la oxidación (sellantes, pinturas, polímeros).
    - Resistir el desgaste (recubrimientos cerámicos).
    - Mejorar el deslizamiento (poliamida, PTFE)
  - Implantación de cables y de conducciones. Este es uno de los aspectos fundamentales que ya deben haberse previsto en etapas anteriores del proyecto. Sin embargo, suele ser ahora cuando se consolidan las soluciones.
  - Determinación de lubricantes y otros fluidos. Hay que determinar el tipo de lubricante (grasa, aceite), la cantidad y las formas de realizar el mantenimiento y el engrasado. También hay que determinar otros fluidos que intervienen en el sistema (agua, aire comprimido, fluidos criogénicos, tintes).

- Listado de piezas y componentes: junto con los planos de detalle y la información sobre los componentes de mercado, es de gran importancia la confección de la lista de piezas y componentes que intervienen en la fabricación de un producto o de una máquina.

Los catálogos técnicos aportan la información básica de la pieza: dimensiones, material, peso, capacidad, etc. Es imprescindible acceder a estos datos, incluso antes de decidir la compra del elemento, para lo cual se recomienda buscar asesores técnicos capacitados y no simplemente representantes comerciales. Dependiendo del tipo de pieza (rodamientos, bandas, cadenas), es necesario seguir un procedimiento de dimensionamiento o selección particular, que incluye el uso de fórmulas y tablas que aportan los catálogos técnicos del fabricante, debiendo definir cada factor en términos lo más objetivos posible, sin ambigüedades.

Por otra parte, para una correcta gestión de la información de las piezas y componentes de un producto, es necesaria una adecuada codificación. En general, cada equipo diseña su propio sistema de codificación teniendo en cuenta los atributos de diseño y los atributos de fabricación. Conviene que los sistemas de codificación incluyan los siguientes aspectos como información asociada:

- Suministrador, plazos de entrega, coste .
- Módulos a los que pertenece (estructuración modular).
- Procesos de fabricación, máquinas y tiempo que requieren.
- Utillajes de forma (moldes, matrices, hileras) en caso de existir.

Los nuevos sistemas informáticos PDM (*Product Data Management*) permiten gestionar la documentación generada durante el diseño de los productos (y posteriores modificaciones) en una base de datos común a los distintos departamentos de la empresa encargada del diseño (finanzas, I+D, fabricación, compras, comercial).

### ➤ *SIMPLIFICAR SOLUCIONES*

El diseño de detalle constituye una magnífica ocasión para simplificar las piezas

y disminuir la complejidad de los sistemas. Algunos de los puntos en que esta tarea de simplificación es más eficaz son:

- Disminuir el número y tipos de elementos de unión (tornillos, tuercas, arandelas, pasadores, chavetas, remaches), de elementos de guiado (cojinetes, rodamientos, guías lineales) y de otros componentes de uso frecuente.
- Eliminar variantes en componentes análogos (unificar soluciones, evitar componentes con mano).
- Refundir piezas y componentes, cuando sea posible.

En el diseño mecánico la síntesis y el análisis constituyen un ciclo iterativo, ya que en todo modelo de cálculo intervienen múltiples variables incógnitas que dependen unas de otras. Esto hace necesario partir de datos disponibles y supuestos, y siguiendo una secuencia lógica de operaciones, generar resultados parciales que se comparan con las restricciones iniciales del problema (o bien factores de seguridad o estándares). Finalmente se aprueba la solución o se corrigen las suposiciones y se inicia de nuevo el ciclo.

### ➤ **INTEGRACIÓN**

Se hace la integración de los subsistemas dependiendo de cómo hayan sido diseñados. Pueden presentarse problemas diversos, tales como interferencia física entre elementos, inconsistencias, omisiones, incompatibilidad entre piezas manufacturadas y elementos comerciales; diferencias en sistemas métricos, capacidades y/o tolerancias. Muchos de estos problemas surgen cuando diferentes personas o departamentos participan en el proyecto; necesitando una excelente coordinación y la implementación de un proceso de diseño paralelo y simultáneo con retroalimentación continua. Si el diseño es individual, aún es necesaria la sincronización constante entre las soluciones de los diferentes subsistemas.

Esta integración implica a su vez la realización de planos de ensamblaje se verifican la consistencia y compatibilidad entre las diferentes piezas comerciales seleccionadas. Los programas CAD incluyen herramientas de ensamblaje que

identifican entre otros problemas, las interferencias dimensionales entre piezas. Igualmente, a través de estos planos, el diseñador puede evaluar detalles de manufactura, ensamblaje, funcionalidad y mantenimiento que se hayan omitido o no se hayan podido analizar durante la síntesis individual de las piezas.

Esto lleva a la elaboración de los planos de taller que deben especificar hasta el último detalle dimensional y de manufactura de cada una de las piezas, utilizando el debido formato y simbología. Los programas CAD generan automáticamente las vistas y cotas a partir de la pieza tridimensional, permitiendo además la adición de anotaciones, detalles, listas de materiales, etc. Para esto, algunos programas cuentan con librerías de formatos y símbolos según diferentes normas, y librerías para el dibujo de piezas comerciales normalizadas, como por ejemplo los tornillos.

### ➤ **REVISIÓN DEL PROYECTO**

Una última función del diseño de detalle es revisar que todas las partes y todos los aspectos del proyecto concuerden. Es importante que esta revisión se realice de forma metódica, para lo cual es de gran utilidad las listas de referencia para el diseño de detalle.

Dada la gran diversidad de tipos de productos y procesos, parece adecuado que estas listas de referencia sean elaboradas por profesionales en base a la experiencia de proyectos anteriores. En todo caso, conviene tener en cuenta los siguientes puntos:

- a) Revisar que se cumplan todas las funciones: revisar que el producto cumpla todas las funciones, tanto las que corresponden a los modos de operación principales como las de los modos de operación ocasionales y accidentales. Por ejemplo, debe comprobarse que: los distintos elementos y sistemas están correctamente dimensionados; las cadenas de cotas y tolerancias aseguren las distintas funciones de movilidad y de sujeción de las piezas y componentes; las juntas y los pasos de cables son compatibles con los requerimientos de estanqueidad. En los modos de operación ocasionales o accidentales es donde con más frecuencia se producen olvidos o desajustes.

- b) Comprobar que sea fabricable: asegurar que todas las piezas son fabricables y dar alternativas cuando se presenten dificultades, evitando, por ejemplo, formas incompatibles con el proceso previsto. Además hay que estudiar y mejorar las secuencias de montaje y prever las herramientas necesarias.
- c) Revisar que el proyecto se encuentre completo: el diseño de detalle ha de proporcionar los documentos necesarios para la fabricación. Por lo tanto, no se ha olvidar ningún detalle: tapas, conectores, lubricación, pintura, indicaciones sobre la máquina o los manuales de instalación, uso y mantenimiento.

---

## 4 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

La metodología expuesta en el Apartado 3 en relación al Procedimiento de Diseño se ha implementado para el desarrollo de una máquina de ensayo con discos de corte. Se pretende con ello comprobar y resaltar la aplicación práctica de los conceptos expuestos para el diseño de nuevos productos, para lo cual, se seguirá el mismo esquema metodológico conformado por las diferentes etapas expuestas, aplicando, según el caso, las herramientas y técnicas que se han considerado más óptimas de acuerdo al diseño propuesto.

### 4.1 BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

A continuación se expondrá el estado de la técnica del dispositivo objeto de estudio en el presente trabajo.

Se llevó a cabo una recopilación bibliográfica de los diferentes estudios realizados en lo que se refiere al arranque de roca mediante discos con el fin de obtener una primera aproximación del mecanismo de rotura así como de los principales factores que influyen en él. Para ello se acudió a revistas científicas especializadas como *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts* a través de bases de datos disponibles en Internet. Una vez identificados los mecanismos existentes por los que se llevan a cabo el estudio de la rotura en rocas empleando las máquinas comúnmente conocidas como TBM, se procedió al diseño de un dispositivo que incorporase el movimiento rotacional del disco de corte para ensayos en laboratorio, algo de lo que carecían las máquinas en base a los diferentes estudios encontrados. Igualmente se llevó a cabo una búsqueda de patentes que pudieran contener similitudes con lo con el dispositivo planteado.

#### ❖ Estado de la Técnica

En general, las máquinas empleadas para la excavación de un macizo rocoso, conocidas como *Tunnel Boring Machines* (TBM), excavan el frente de roca en la sección completa del túnel mediante la acción combinada de la rotación y el empuje. Durante la etapa de estudio y construcción de un proyecto de excavación es de vital

importancia contar con la información necesaria sobre las condiciones de la roca y del método de excavación empleado. Así pues, los parámetros más importantes que pueden emplearse en el estudio y diseño de las TBMs se pueden dividir en dos categorías:

1. **Condiciones del macizo rocoso.** Incluyen parámetros relacionados con características de la roca intacta y del macizo rocoso:

A. Características de la roca intacta:

- Resistencia de la roca intacta (expresada como resistencia a compresión uniaxial, resistencia a tracción y/o índice de carga puntual  $I_{50}$ ).
- Dureza (índice de penetración) y perforabilidad (DRI o Drilling Rate Index).
- Índice de fragilidad (BI, expresado como el cociente entre la resistencia a compresión uniaxial y la resistencia a tracción).
- Índice de abrasividad (índice de Cerchar CAI).
- Otros (coeficiente de Poisson  $\nu$ , Módulo de Elasticidad  $E$ , ángulo de fricción interna  $\Phi$ , porosidad, tamaño de grano, etc.).

B. Condiciones del macizo rocoso y discontinuidades:

- Espaciamiento entre discontinuidades, Rock Quality Designation (RQD).
- El ángulo entre el eje del túnel y los planos de debilidad.
- Clasificación del macizo rocoso en base a índices como el RMR (Rock Mass Rate) o el índice  $Q$ .
- Otros parámetros tales como las tensiones del macizo o afluencia de agua.

2. **Parámetros de la máquina TBM.** Entre estos parámetros destacan:

- Empuje (carga por cortador).
- Torsión.
- Revoluciones por minuto (R.P.M.).
- Potencia.

- Especificaciones del disco, tales como el número de discos en la cabeza de corte, espaciamiento entre discos, el diámetro, anchura del filo, etc.

Para la predicción del rendimiento de las máquinas tuneladoras existen gran variedad de modelos. Algunos de ellos están basados, principalmente, en uno o dos parámetros de la roca, mientras otros se basan en una combinación de los resultados obtenidos en el laboratorio y en el terreno junto con parámetros asociados a la máquina.

En general, los métodos para la predicción del rendimiento de las TBM se clasifican en dos categorías: modelos teóricos/experimentales (basados en ensayos de laboratorio encaminados a estudiar las fuerzas implicadas durante el proceso de excavación); y modelos empíricos (basados en estimaciones y estudios hechos sobre el terreno donde se establecen relaciones entre los parámetros mecánicos de la tuneladora y las características geomecánicas del macizo rocoso). A continuación se citan algunos de los métodos utilizados para predecir el rendimiento de las tuneladoras.

#### *Modelos teóricos/experimentales*

Los modelos teóricos/experimentales han sido utilizados por diferentes autores para hacer una estimación de las fuerzas que actúan en los discos de corte. Estimar estas fuerzas es un aspecto crítico en toda excavación pues permitirá la obtención de parámetros esenciales para predecir rendimientos, especificaciones en el tipo de máquina a emplear y las características adecuadas para una optimización de la cabeza de corte. En diferentes estudios [16, 11, 40, 38], se pone de manifiesto una importante correlación entre la resistencia a compresión de la roca y la energía específica, definida esta última como la cantidad de energía necesaria para excavar una unidad volumétrica de roca. Además a través del estudio de se estudió la influencia de las discontinuidades y planos de debilidad [34, 27, 36, 39, 33], se ha observado, en todos los casos, una significativa reducción de las fuerzas que actúan en el disco en presencia de juntas, excepto para juntas orientadas en dirección normal a la de corte.

En el mismo sentido, en el Departamento de Ingeniería de Excavación y Mecánica del Terreno (*Excavation Engineering and Earth Mechanics Department*) de la Universidad de Colorado (*Colorado School of Mines* o CSM) se desarrolló un modelo

de predicción de la velocidad de penetración en túneles. La primera versión de este modelo fue publicado por Ozdemir [27] y actualizada posteriormente por Rostami [33, 31]. El modelo de CSM pretende hacer una estimación de la fuerza necesaria para una penetración dada, basándose en las propiedades de la roca, en las características del disco y en la geometría del corte. El modelo se apoya en los resultados obtenidos a través de ensayos de laboratorio empleando un disco de corte en sentido lineal. Algunos de los resultados de ensayo así como el dispositivo se presentan en [26].

En la Figura 4.1 se muestra un esquema del ensayo así como una fotografía de la máquina que posee la Universidad de Seúl (*Rock Mechanics and Rock Engineering Laboratory, Department of Energy Systems Engineering*) que de igual modo realizan estos ensayos.

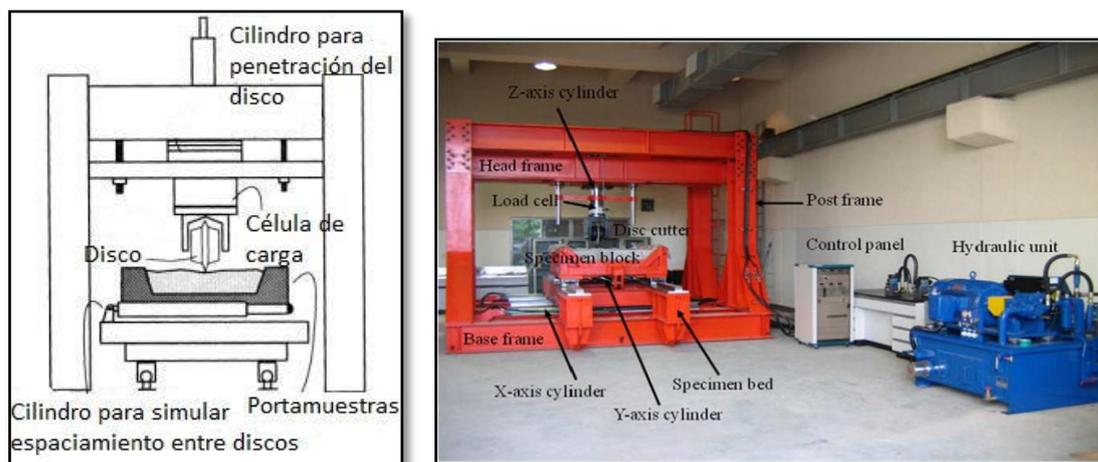


Figura 4.1.- Linear Cutting Test

El problema es que, aunque *a priori* este ensayo podría ayudar a descifrar las incertidumbres que no se identifican mediante los ensayos de caracterización de las rocas, tiene el inconveniente de realizarse únicamente en sentido lineal y no siguiendo una trayectoria curva, de tal modo que no simula fielmente las condiciones reales de excavación con una cabeza de TBM.

Igualmente, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Ehime (Japón), Muro *et al.* [23], establecieron un modelo de predicción de la mínima energía específica requerida en la excavación a partir del análisis de parámetros fundamentales, tales como las fuerzas involucradas en el corte, la potencia de la máquina durante la excavación, el espaciamiento entre discos, la profundidad de penetración y el ángulo del disco.

Para establecer este modelo se realizó un ensayo con un disco de corte que simula de forma aproximada el giro del útil. Como se puede ver en la Figura 4.2, el equipo de ensayo empleado por la Universidad de Ehime tiene unas dimensiones de 150 cm de altura, 70 cm de ancho y 70 cm de longitud.

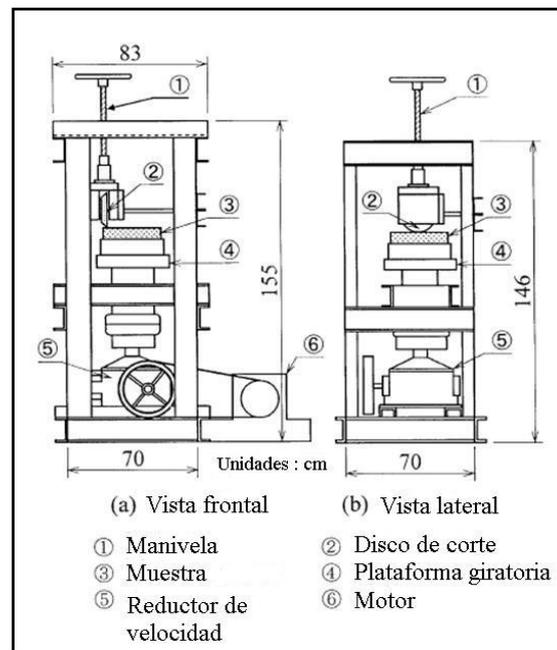


Figura 4.2.- Máquina para ensayar con rotación

Dispone de una plataforma giratoria de 40 cm de diámetro y 6,50 cm de espesor que es accionada por un motor de 1,50 kW para así reproducir el giro del disco. Esta plataforma gira a una velocidad de rotación de 1,75 rpm, y sobre la misma es donde se sitúa la muestra cilíndrica de dimensiones 22 a 26 cm y 9,50 cm de espesor. El disco puede ser posicionado en la vertical mediante un sistema constituido por una manivela y tres células de carga para medir las fuerzas normal, tangencial y lateral que actúan en el disco de igual modo que hacen en la Universidad de Colorado. El disco, por su parte puede rotar a una velocidad de 1,83 cm/s en torno a un lugar geométrico circular de 10 cm de radio.

El problema del modelo radica en el grado de representatividad de los resultados obtenidos debido a que la escala a la que se realiza el ensayo es de dimensiones excesivamente reducidas. Además, el giro del disco se simula gracias a una plataforma giratoria donde va situada la muestra y no reproduciendo el giro del disco tal como hace

---

una cabeza de TBM.

#### *Modelos empíricos*

Existen métodos empíricos que, basándose en las variables que intervienen en la resistencia de un macizo rocoso y asignándoles valores numéricos de acuerdo a su incidencia, establecen relaciones matemáticas para obtener una característica numérica que permita estimar los diferentes parámetros de ejecución de un proyecto. Estos métodos se han establecido a través de estudios e investigaciones realizadas en campo. La principal ventaja de las investigaciones realizadas in situ sobre ensayos realizados en laboratorio es que contienen tanto aspectos relacionados con la máquina como propiedades del macizo rocoso. Fundamentalmente destacan dos métodos: el índice  $Q_{TBM}$  y el RME.

- El índice  $Q_{TBM}$  es una modificación del índice  $Q$  desarrollado por Barton [4], para determinar las velocidades de penetración de una máquina excavadora. Este índice combina los parámetros del sistema de clasificación geomecánica de macizos rocosos  $Q$  con parámetros mecánicos de la máquina excavadora, como son la fuerza de empuje, el número de cortadores, las revoluciones de la cabeza de corte y el índice de vida del cortador. Con la determinación de este índice se han establecido relaciones con la velocidad de penetración.

- Bienawski *et al.* [5] formularon el RME (*Rock Mass Excavability*) como un índice para predecir la excavabilidad del macizo mediante tuneladoras para roca, proporcionando una cuantificación del rendimiento de las mismas y constituyendo una nueva herramienta para escoger el método constructivo de un túnel empleando TBMs. Este índice se estableció a partir de un estudio en el que se determinó que los parámetros que tenían mayor influencia sobre la velocidad media de avance de las tuneladoras eran la perforabilidad, el espaciado de las discontinuidades y el tiempo de autoestabilidad de la excavación. A este grupo de parámetros más influyentes se decidió incorporar otros dos para definir el comportamiento del terreno ya que ambos tienen gran influencia en el rendimiento de las tuneladoras: la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta y el caudal de agua infiltrada en la excavación. Este índice tiene una estructura similar a la del RMR ya que se calcula sumando la valoración de los

cinco parámetros anteriores. Con los resultados obtenidos se han establecido varias correlaciones entre el valor del índice y algún parámetro significativo como la velocidad media de avance. El problema de estos métodos empíricos estriba en que, a través de diferentes estudios realizados [6, 37, 28], se ha comprobado que utilizan parámetros en algunos casos irrelevantes e incluso confusos, en relación con el rendimiento de las TBM. Por otra parte, mediante estos métodos se obtiene una gran dispersión de resultados.

Recientemente, se han llevado a cabo estudios encaminados a solventar los problemas que aquí se han expuesto. Tal es así, que Jalali y Naghadehi [19] diseñaron e implementaron un dispositivo, provisto de 20 discos de diferentes tamaños, capaz de funcionar en modo de rotación – percusión. Los resultados de los ensayos muestran que este modo de funcionamiento es muy efectivo para el corte del material. Sin embargo, diferentes investigadores han seguido empleando dispositivos donde la trayectoria del disco sobre la roca es lineal, como muestran los trabajos de Rostami [32], Balci y Tumac [3], Cho *et al* [9]. Rostami estudió la distribución de tensiones en la zona de interacción entre el disco y la roca y observó que el área de distribución era menor a lo que se había asumido hasta el momento de acuerdo a los modelos previos. Balci y Tumac estudiaron los factores que influyen en la cortabilidad de la roca, a través de resultados experimentales, teóricos y trabajos de campo, confirmando que las características estructurales parecen tener una gran influencia en el mecanismo de rotura. Por su parte Cho *et al*, evaluaron la eficiencia del corte empleando el dispositivo lineal sobre material granítico, empleando para ello medidas fotogramétricas para la determinación del volumen excavado. Incluso han surgido nuevos modelos de predicción de la energía específica requerida por una máquina TBM en la excavación de un frente rocoso, como muestran Wang *et al* [42], aunque como ellos mismos mencionan, se tratan de estudios aun en fase de investigación, siendo necesario profundizar en ellos de cara a demostrar su aplicabilidad.

Por tanto, es importante destacar el interés actual de este campo, que hace que se encuentre en continua investigación a través de los diferentes estudios de reciente publicación.

## 4.2 ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Existen especificaciones muy extensas y que incluyen aspectos tales como acuerdos contractuales y garantías. Sin embargo no es lo que se pretende en esta redacción de las especificaciones, de manera que el ejemplo presentado contiene el nivel de detalle apropiado de acuerdo a los conceptos presentados.

<b>ESPECIFICACIONES PARA UN DISPOSITIVO DE ENSAYO QUE EMPLEE DISCOS DE CORTE</b>	
Prólogo	<p>Actualmente, existen tanto modelos empíricos basados en índices de clasificación del macizo rocoso, como ensayos con discos para el análisis del proceso de rotura y estimación de rendimientos de las tuneladoras.</p> <p>Sin embargo se ha comprobado que ambos métodos de estudio presentan restricciones. Por una parte, mediante el estudio de los ensayos realizados hasta la fecha, se han visto limitaciones, en unos casos por realizarse únicamente en sentido lineal y no simulando la trayectoria curva tal como excavan las TBMs, o en otros casos por el grado de representatividad de los resultados obtenidos al realizarse el ensayo sobre muestras excesivamente pequeñas. Por otra parte, el estudio de los modelos empíricos basados en índices de clasificación del macizo rocoso para la estimación de la velocidad de penetración en túneles no parece ser una de las mejores vías a la hora de predecir el rendimiento de las tuneladoras, pues diversos trabajos publicados y reconocidos han dejado patente que no se puede asegurar un cálculo preciso de dicha velocidad de penetración con ellos, pues utilizan parámetros en algunos casos irrelevantes e incluso confusos, en relación con el rendimiento de las TBM. Por otra parte, mediante estos métodos se obtiene una gran dispersión de resultados.</p>

<p>Introducción</p>	<p>Los objetivos son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Diseñar un dispositivo para la realización de ensayos que permita analizar el mecanismo de rotura en roca.</li> <li>- Diseñar un dispositivo provisto al menos de un disco de corte desplazable que se pone en contacto con una muestra de roca y que rueda sobre ella.</li> <li>- Diseñar el dispositivo de tal modo que el disco de corte sea desplazable a lo largo de tres ejes ortogonales X, Y, Z, y que pivote al menos alrededor del eje Z, consiguiendo simular una trayectoria curva de modo similar a la trayectoria descrita por una cabeza de tuneladora cuando excava un macizo rocoso.</li> </ul>
<p>Ámbito de aplicación</p>	<p>El dispositivo de ensayo resulta de aplicación en los sectores en que se diseñen, produzcan o utilicen dispositivos que empleen discos de corte para la excavación en roca, como es el caso de las TBMs.</p>
<p>Especificaciones de diseño</p>	<p>El dispositivo que aloje el disco de corte debe permitir el desplazamiento según tres ejes ortogonales X, Y, Z, donde X es el eje longitudinal horizontal, el eje Y es transversal horizontal, y el eje Z es vertical, y que pivota al menos alrededor del eje Z. Se entenderá ortogonal como un valor angular de 90° con una desviación máxima admisible de <math>\pm 5^\circ</math>.</p> <p>El tamaño total máximo del dispositivo será de 1,20 m en el eje X; 1,20 m en el eje Y; y 1,20 m en el eje Z. El tamaño máximo de la muestra de ensayo será de 50 cm x 50 cm x 50 cm. La muestra estará alojada en un portamuestras que la contenga adecuadamente.</p> <p>El útil de corte será de al menos un disco de corte alojado en</p>

	<p>un cabezal que lo contenga adecuadamente.</p> <p>El desplazamiento en cada eje ortogonal se realizará mediante unos medios de transmisión que transmitirán el movimiento de unos medios motores y desplazan el cabezal.</p> <p>Por cada eje se llevará a cabo un control numérico pero acoplado para que funcione como una máquina de trabajo conjuntamente.</p> <p>Las fuerzas de aplicación máximas consideradas serán de 60 kN en dirección vertical, y una décima parte de la fuerza vertical para la fuerza en la dirección de corte.</p> <p>La frecuencia de aplicación de los ciclos de carga, así como las velocidades de desplazamiento según los ejes X, Y, y velocidad rotacional en torno al eje Z, deben poder modificarse.</p> <p>El dispositivo estará provisto de mecanismos de instrumentación, para que, a través de unos medios de adquisición, se registren los datos de interés para el análisis de resultados, entendiendo como tales al menos, parámetros de fuerzas de aplicación y desplazamientos en cada eje.</p> <p>El rango de temperatura durante la operación es entre -10°C y 50°C. La humedad puede variar entre 0 y 80%.</p> <p>El coste de fabricación del mecanismo debe ser inferior a 20.000 €.</p> <p>La fiabilidad requerida es del 90% en las 1000 horas de trabajo.</p> <p>Todos los componentes deben ser resistentes a la degradación atmosférica propia de laboratorios industriales.</p> <p>El armazón estructural que englobe la máquina debe asegurar la estabilidad de todo el conjunto, incluyendo la muestra de roca.</p>
--	---

Especificaciones de fabricación	<p>Los componentes que integren el dispositivo serán acabados en fábrica en la medida de lo posible. El ensamblaje final podrá ser realizado en el lugar de trabajo con el fin de facilitar el transporte de los componentes individualmente.</p> <p>Se puede emplear cualquier material siempre y cuando cumplan los estados de esta especificación.</p>
Estándares de aceptación	<p>Cada componente será inspeccionado antes de su montaje en la máquina.</p> <p>Se llevarán a cabo ensayos en plena carga para verificar los niveles de fiabilidad y resistencia a la fatiga.</p> <p>El dispositivo no debe estar en conflicto con patentes anteriores.</p>
Limitaciones	<p>El mecanismo no debe contener ningún material peligroso y todos los materiales empleados deben estar claramente identificados.</p>
Especificaciones operativas	<p>Debe ser posible la observación de la zona de aplicación de la carga de forma frontal y lateral.</p> <p>El ensayo propiamente dicho debe llevarse a cabo fácilmente por el operador. El sistema de adquisición de datos para futuros análisis será electrónico.</p> <p>El dispositivo debe estar libre de mantenimiento durante la vida de la máquina.</p>

### 4.3 GENERACIÓN DE CONCEPTOS

Para la generación de ideas o conceptos en el dispositivo objeto de estudio, se llevó a cabo un planteamiento combinando la técnica del análisis morfológico y del *brainstorming*.

En primer lugar se establecieron las propiedades o características del producto,

---

para, a continuación, mediante una sesión de *brainstorming*, señalar las posibles variaciones o soluciones de cada propiedad. Con todo ello se realizó una tabla que ayudase a visualizar las diferentes combinaciones posibles.

Teniendo en cuenta consideraciones redactadas en las especificaciones, como por ejemplo, el tipo de desplazamiento exigible o los parámetros a estudiar (al menos fuerza y desplazamiento) se plantearon las siguientes características o propiedades a estudiar:

- Modo de funcionamiento del dispositivo
- Materiales empleados en la estructura
- Desplazamiento lineal en el plano horizontal (ejes X, Y)
- Desplazamiento lineal en el plano vertical (eje Z)
- Desplazamiento rotacional
- Accionamiento de los mecanismos de desplazamiento
- Instrumentación

En la Tabla 4.1 se puede muestra la matriz generada a partir de las diferentes soluciones aportadas para cada característica.

Características	Soluciones						
Modo de funcionamiento del dispositivo	Automático según todos los ejes		Automático/manual: combinación según el eje desplazamiento		Manual según todos los ejes		
Materiales empleados en la estructura	Acero estructural		Aluminio		Hierro		
Desplazamiento lineal en el plano horizontal (ejes X, Y)	Sistemas de guiado lineal (mesas lineales)	Sistemas de guiado lineal plano (raíles)	Guías lineales modulares	Rodamientos cilíndricos	Sistemas de piñón-cremallera	Husillos	Cilindros (neumáticos/hidráulicos)
Desplazamiento lineal en el plano vertical (eje Z)	Sistemas de guiado lineal (mesas lineales)	Sistemas de guiado lineal plano (raíles)	Guías lineales modulares	Rodamientos cilíndricos	Sistemas de piñón-cremallera	Husillos	Cilindros (neumáticos/hidráulicos)
Desplazamiento rotacional	Engranajes		Poleas con correas		Ruedas de fricción		Tornillo sin fin - rueda

Características	Soluciones					
Accionamiento de los mecanismos de desplazamiento	Motor de corriente alterna	Motor de corriente continua	Motores universales	Motores sin escobillas	Servomotores	Motores de paso
Instrumentación						
Posición y desplazamiento (lineal y angular)	Extensómetros y potenciómetros	Transformador variable (LVDT)		Generadores de frecuencia		Codificadores digitales (Encoders)
Fuerza	Célula de carga		Transductor de presión		Manómetro	
Velocidad (lineal y angular)	Dinamo tacométrica		Encoder		Detector inductivo u óptico	
Temperatura	Transductores termorresistivos			Transductores generadores termoeléctricos (termopares)		

Tabla 4.1.- Matriz de análisis morfológico de la máquina de ensayo de discos de corte

Tras este análisis, ya se tomaron algunas decisiones iniciales, de cara a facilitar las fases posteriores. Así, se decidió emplear como material para la estructura exterior que soportase la máquina propiamente dicha, perfiles de acero estructural normalizados, ya que aunque encarezca el presupuesto, ofrecen un mayor nivel de seguridad, fiabilidad y estabilidad para soportar los esfuerzos a los que se verá sometido el dispositivo frente a las otras opciones.

Además, una de las especificaciones se refería a la facilidad de maniobrar el operario durante los ensayos. Por ello, para facilitar en la medida de lo posible este aspecto la máquina deberá trabajar de modo automático en todos sus ejes. Además no cabe duda que el hecho de que el dispositivo funcione de modo manual introduciría más variabilidad e incertidumbre propia del factor humano.

Por otra parte hay aspectos como son el método de accionamiento como la instrumentación que convendría decidir una vez se hayan seleccionado los conceptos relativos a los mecanismos de desplazamiento según las diferentes direcciones. Por ello, en el siguiente capítulo, se centrará el problema a la selección de los mecanismos de desplazamiento lineal en el plano horizontal (ejes X e Y), desplazamiento lineal en el plano vertical (eje Z), y desplazamiento rotacional en torno al eje Z, exponiendo de manera detallada una metodología para la selección de estos conceptos.

## **4.4 SELECCIÓN DE CONCEPTOS**

Con las especificaciones definidas, una vez se generaron los conceptos para el diseño del dispositivo de ensayos con discos de corte, a continuación se pasaron a seleccionar los conceptos.

Como se indicó anteriormente, tras la generación de ideas, se tomaron decisiones respecto a algunas de las características evaluadas, como el modo de funcionamiento o el material a emplear para el soporte de la máquina propiamente dicha. Así pues, el problema se centrará en la selección de los mecanismos de desplazamiento lineal en el plano horizontal (ejes X e Y), desplazamiento lineal en el plano vertical (eje Z), y desplazamiento rotacional en torno al eje Z, exponiendo de manera detallada una metodología para la selección de todos estos conceptos.

Dicha metodología, para cada característica, se centrará en:

1. Realización de una matriz de decisión para la clasificación y ponderación de los criterios de selección.
2. En base a la anterior matriz, se considerarán las diferentes alternativas generadas para cada característica, estableciendo factores de ponderación desde 0 a 100 que proporcionan una estimación acerca de la medida en que cada alternativa cumple cada uno de los criterios.
3. Una vez ponderados los criterios y las alternativas, se multiplican y se suman las calificaciones ponderadas. La alternativa elegida será la que haya obtenido mayor calificación.

❖ **Mecanismo de desplazamiento lineal en el plano horizontal (ejes X e Y)**

Para la selección de la alternativa de diseño del mecanismo de desplazamiento en el plano horizontal según los ejes X e Y se considerarán los siguientes factores:

- *Precisión*: es la desviación de la medida real de la medida nominal, descrita mediante tolerancias. Se trata de uno de los parámetros más importantes a la hora de seleccionar sistemas de movimiento lineal.
- *Velocidad*: velocidad admisible de los mecanismos lineales que variará fundamentalmente el tipo, tamaño, tolerancias, cargas aplicadas y condiciones de lubricación de los mecanismos empleados.
- *Capacidad de carga*: las características, magnitud y dirección de cargas que actúan sobre los mecanismos de desplazamiento lineal son extremadamente variables. En general, estas capacidades de carga indican la capacidad de manejo de carga, y es necesario diferenciar entre capacidades de carga estáticas y capacidades dinámicas. Según el dispositivo, las capacidades de carga dinámicas permiten calcular la vida útil cuando un sistema se acciona bajo una carga, o en el caso de las capacidades estáticas, el factor de seguridad estático.
- *Transmisión de potencia*: capacidad del sistema para transmitir la potencia requerida para el correcto funcionamiento de la máquina.

- *Desgaste*: modificación no deseada de las medidas y/o de las superficies de los materiales debido a las fuerzas de fricción.
- *Coefficientes de fricción*: es el índice adimensional de la fricción que resulta de la relación de la fuerza de fricción a la fuerza normal.
- *Costes*: precio unitario del sistema de desplazamiento lineal.
- *Ruido*: nivel de ruido admisible de acuerdo a los estándares de aceptación. Interesará un funcionamiento en la medida de lo posible, silencioso.
- *Momento*: se refiere al momento estático admisible, según los diferentes ejes. Cuando un sistema lineal recibe un momento, los elementos giratorios de ambos extremos reciben el máximo esfuerzo dada la distribución irregular de dicho esfuerzo sobre los elementos giratorios del sistema. Se refiere a la capacidad de soportar momentos en todos los ejes
- *Rigidez*: es la resistencia a la deformación o al desplazamiento bajo carga, en la zona de la deformación elástica. Depende del tipo de sistema, de su capacidad de carga y del tipo de construcción del mismo.

Con los criterios de selección definidos, deben clasificarse por nivel de importancia de acuerdo a las exigencias requeridas, como muestra la Tabla 4.2.

Criterios	Criterios											
	Precisión	Velocidad	Capacidad de carga	Transmisión potencia	Desgaste	Coefficiente de fricción	Costes	Ruido	Momento	Rigidez	Total	Clasificación
Precisión		1	0	1	1	1	1	1	1	1	8	2°
Velocidad	0		0	1	0	0	1	1	0	0	3	6°
Capacidad de carga	1	1		1	1	1	1	1	1	1	9	1°
Transmisión de potencia	0	0	0		0	0	1	1	0	0	2	8°
Desgaste	0	1	0	1		0	1	0	0	0	3	7°
Coefficientes de fricción	0	1	0	1	1		0	1	0	0	4	5°
Costes	0	0	0	0	0	1		0	0	0	1	10°
Ruido	0	0	0	0	1	0	1		0	0	2	9°
Momento	0	1	0	1	1	1	1	1		0	6	4°
Rigidez	0	1	0	1	1	1	1	1	1		7	3°
											<b>45</b>	

Tabla 4.2.- Clasificación de criterios de selección para el mecanismo de desplazamiento en el plano horizontal

Una vez se tienen los criterios clasificados, se asigna a cada criterio un factor de ponderación normalizado dividiendo el número total de decisiones tomadas, como muestra la Tabla 4.3.

Criterios	Total	Clasificación	Ponderación
Precisión	8	2°	0,177
Velocidad	3	6°	0,066
Capacidad de carga	9	1°	0,200
Transmisión de potencia	2	8°	0,044
Desgaste	3	7°	0,066
Coefficientes de fricción	4	5°	0,088
Costes	1	10°	0,022
Ruido	2	9°	0,044
Momento	6	4°	0,133
Rigidez	7	3°	0,155
	45		1,000

**Tabla 4.3.- Matriz de ponderación de criterios para el mecanismo en el plano horizontal**

A continuación, deben reorganizarse los criterios colocando en primer lugar aquellos con los coeficientes más altos en la parte superior. Esto permite, a través de la construcción de la matriz mostrada en la Tabla 4.4, enfrentar cada criterio con las posibles soluciones y llegar a adoptar la solución más adecuada.

En este caso se asignarán unos porcentajes para indicar en qué medida cada solución cumple con cada criterio particular. Se asignarán porcentajes comprendidos entre 0 y 100, de tal modo que un cero implica que esa solución no cumple bajo ningún concepto con ese criterio. Una vez que se hayan asignado los porcentajes, los valores se multiplican por el factor de ponderación de ese criterio particular. Al final estos valores se suman para dar un porcentaje total.

Las alternativas aquí mostradas son las que se generaron en el apartado

correspondiente de generación de ideas. Sin entrar a desarrollar exhaustivamente cada una de estas alternativas, a modo general se caracterizan por:

- Sistemas de guiado lineal (mesas lineales): se trata de rodamientos lineales de alta precisión y de alta rigidez diseñados para utilizar el movimiento de los elementos rodantes. Tienen numerosas características ventajosas, incluyendo la baja fricción, sin atascos, y un movimiento lineal suave incluso bajo condiciones de carga elevada.
- Sistemas de guiado lineal plano (raíles): se trata se sistemas muy ligeros con pequeños costes de ensamblaje. Suelen emplearse para equipos de medición, equipos electrónicos o máquinas de trazado.
- Guías lineales modulares: sistemas de movimiento lineal útiles para aplicaciones de automatización industrial que requieren altas velocidades y/o capacidades para largos recorridos. Por lo general, en un solo eje integran una guía deslizante y un tornillo de bolas de precisión, pero suelen conllevar mayores costes.
- Rodamientos cilíndricos: se trata de mecanismos capaces de realizar movimientos giratorios con un coeficiente de fricción extremadamente bajo y no son excesivamente caros. El movimiento lineal suele ser usado para una gran variedad de aplicaciones, incluyendo equipos de transporte, equipos de procesamiento de alimentos y equipos de fabricación de semiconductores.
- Sistemas piñón – cremallera: sistema de transmisión muy suave y preciso que permite transmitir potencias mecánicas elevadas.
- Husillos: sistemas caracterizados por una elevada precisión haciéndolos especialmente adecuados cuando se requiere para aplicaciones de posicionamiento.
- Cilindros (neumáticos/hidráulicos): son unidades que transforman la energía potencial del aire comprimido o de un fluido en energía cinética o en fuerzas prensoras. Básicamente consisten en un recipiente cilíndrico provisto de un émbolo o pistón. Recomendados cuando se pretenda transmitir grandes potencias.

Por tanto, del análisis de la selección de conceptos de acuerdo a la metodología expuesta y mostrada en la Tabla 4.4, se deduce que los husillos suponen la mejor opción para producir el desplazamiento en el plano horizontal (en el eje X y eje Y).

Criterios	Ponderación	Alternativas propuestas													
		Sistemas guiado lineal (mesas lineales)		Sistemas guiado lineal plano (raíles)		Guías lineales modulares		Rodamientos cilíndricos		Sistemas de piñón-cremallera		Husillos		Cilindros (neumáticos/hidráulicos)	
		% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación
Capacidad de carga	0,200	80	16	15	3	60	12	50	10	80	16	70	14	50	10
Precisión	0,177	40	7,08	30	5,31	60	10,62	70	12,39	70	12,4	80	14,16	40	7,08
Rigidez	0,155	70	10,85	20	3,10	50	7,75	40	6,20	80	12,4	60	9,30	50	7,75
Momento	0,133	60	7,98	70	9,31	70	9,31	20	2,66	50	6,65	20	2,66	40	5,32
Coefficientes de fricción	0,088	30	2,64	80	7,04	30	2,64	50	4,40	20	1,76	40	6,52	90	7,92
Velocidad	0,066	70	4,62	60	3,96	50	3,3	80	5,28	20	1,32	80	5,28	40	2,64
Desgaste	0,066	30	1,98	70	4,62	30	1,98	40	2,64	20	1,32	30	1,98	80	5,28
Transmisión de potencia	0,044	50	2,20	40	1,76	50	2,20	40	1,76	80	3,52	60	2,64	80	3,52
Ruido	0,044	80	3,52	70	3,08	80	3,52	70	3,08	30	1,32	80	3,52	70	3,08
Costes	0,022	50	1,10	90	1,98	50	1,10	70	1,54	30	0,66	80	1,76	60	1,32
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>57,97</b>		<b>43,16</b>		<b>54,42</b>		<b>49,95</b>		<b>57,34</b>		<b>58,82</b>		<b>53,91</b>	

Tabla 4.4.- Matriz de selección de conceptos para el mecanismo de desplazamiento en el plano horizontal (ejes X e Y)

❖ Mecanismo de desplazamiento lineal en el plano vertical (ejes Z)

Para el desplazamiento en el plano vertical se han considerado los mismos criterios de selección que se emplearon para el plano horizontal, pero en este caso primarán otros aspectos, como se deduce de la Tabla 4.5.

Criterios	Criterios											
	Precisión	Velocidad	Capacidad de carga	Transmisión potencia	Desgaste	Coefficiente de fricción	Costes	Ruido	Momento	Rigidez	Total	Clasificación
Precisión		1	0	0	1	1	1	1	1	1	7	3°
Velocidad	0		0	0	1	0	0	0	0	0	1	9°
Capacidad de carga	1	1		0	1	1	1	1	1	1	8	2°
Transmisión de potencia	1	1	1		1	1	1	1	1	1	9	1°
Desgaste	0	0	0	0		0	1	1	0	0	2	7°
Coefficientes de fricción	0	1	0	0	1		1	1	1	1	6	4°
Costes	0	1	0	0	0	0		0	0	0	1	10°
Ruido	0	1	0	0	0	0	1		0	0	2	8°
Momento	0	1	0	0	1	0	1	1		0	4	6°
Rigidez	0	1	0	0	1	0	1	1	1		5	5°
											<b>45</b>	

Tabla 4.5.- Clasificación de criterios de selección para el mecanismo de desplazamiento en el plano vertical

Una vez clasificados los criterios, el procedimiento al igual que anteriormente, consistirá en asignar a cada criterio un factor de ponderación normalizado dividiendo el número total de decisiones tomadas, como muestra la Tabla 4.6.

Criterios	Total	Clasificación	Ponderación
Precisión	7	3°	0,155
Velocidad	1	9°	0,022
Capacidad de carga	8	2°	0,177
Transmisión de potencia	9	1°	0,200
Desgaste	2	7°	0,044
Coefficientes de fricción	6	4°	0,133
Costes	1	10°	0,022
Ruido	2	8°	0,044
Momento	4	6°	0,088
Rigidez	5	5°	0,111
	45		1,000

**Tabla 4.6.- Matriz de ponderación de criterios para el mecanismo de desplazamiento en el plano vertical**

A continuación, se reorganizan de nuevo los criterios colocando en primer lugar aquellos con los coeficientes más altos en la parte superior, para enfrentar cada criterio con las posibles soluciones y llegar a adoptar la solución más adecuada.

Igual que se procedió en el caso anterior, se asignarán unos porcentajes comprendidos entre 0 y 100 para indicar en qué medida cada solución cumple con cada criterio particular. Una vez que se hayan asignado los porcentajes, los valores se multiplican por el factor de ponderación de ese criterio particular. Al final estos valores se suman para dar un porcentaje total.

El resultado es el mostrado en la Tabla 4.7.

Criterios	Ponderación	Alternativas propuestas													
		Sistemas guiado lineal (mesas lineales)		Sistemas guiado lineal plano (raíles)		Guías lineales modulares		Rodamientos cilíndricos		Sistemas de piñón-cremallera		Husillos		Cilindros (neumáticos/hidráulicos)	
		% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación
Transmisión de potencia	0,200	50	10	40	8	50	10	40	8	80	16	60	12	80	16
Capacidad de carga	0,177	80	14,22	15	2,66	60	10,66	50	8,88	80	14,2	70	12,44	50	8,88
Precisión	0,155	40	6,22	30	4,66	60	9,33	70	10,88	70	10,8	80	12,44	40	6,22
Coefficientes de fricción	0,133	30	4	80	10,6	30	4	50	6,66	20	2,66	40	5,33	90	12
Rigidez	0,155	70	7,77	20	2,22	50	5,55	40	4,45	80	8,88	60	6,67	50	5,56
Momento	0,133	60	5,33	70	6,22	70	6,22	20	1,77	50	4,44	20	1,77	40	3,55
Desgaste	0,066	30	1,33	70	3,11	30	1,33	40	1,77	20	0,88	30	1,33	80	3,55
Ruido	0,044	80	3,55	70	3,11	80	3,55	70	3,11	30	1,33	80	3,55	70	3,11
Velocidad	0,066	70	1,55	60	1,33	50	1,11	80	1,77	20	0,44	80	1,77	40	0,88
Costes	0,022	50	1,11	90	2	50	1,11	70	1,55	30	0,66	80	1,77	60	1,33
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>55,11</b>		<b>44</b>		<b>52,88</b>		<b>48,88</b>		<b>60,44</b>		<b>59,11</b>		<b>61,11</b>	

**Tabla 4.7.- Matriz de selección de conceptos para el mecanismo de desplazamiento en el plano vertical (eje Z)**

De acuerdo a los resultados, el mecanismo recomendado para el desplazamiento vertical son los cilindros (neumáticos/hidráulicos). Este tipo de mecanismos precisamente es el más idóneo cuando de lo que se trata de transmitir grandes potencias. De ahí que sea la mejor opción para simular el empuje del dispositivo de corte sobre la muestra de roca a ensayar.

❖ **Mecanismos de desplazamiento rotacional (en torno al eje Z)**

Para la selección de la alternativa de diseño del mecanismo de desplazamiento

rotacional en torno al eje Z se considerarán los siguientes factores mostrado en la Tabla 4.8:

- Transmisión de potencia, referido a la capacidad para transmitir esfuerzos mayores o más pequeños.
- Permitir que se modifique el sentido de giro.
- La frecuencia de averías, ya que por lo general, este tipo de mecanismos tienden a aumentar la frecuencia de fallos.
- Necesidad de lubricación para evitar el desgaste, ligado a su vez con la frecuencia de averías.
- Ruido: interesa que en la medida de lo posible el funcionamiento sea silencioso.
- Coste del mecanismo.

Criterios	Criterios							
	Inversión sentido giro	Coste	Averías	Transmisión potencia	Ruido	Necesidad lubricación	Total	Clasificación
Inversión sentido giro		1	1	0	1	1	4	2°
Coste	0		0	0	1	0	1	6°
Averías	0	1		0	1	1	3	3°
Transmisión de potencia	1	1	1		1	1	5	1°
Ruido	0	0	0	0		1	1	5°
Necesidad lubricación	0	1	0	0	0		1	4°
							<b>15</b>	

**Tabla 4.8.- Clasificación de criterios de selección para el mecanismo rotacional**

Con los criterios de selección definidos, deben clasificarse por nivel de importancia de acuerdo a las exigencias requeridas, como muestra la Tabla 4.9.

Criterios	Total	Clasificación	Ponderación
Inversión sentido giro	4	2°	0,266
Coste	1	6°	0,066
Averías	3	3°	0,200
Transmisión de potencia	5	1°	0,333
Ruido	1	5°	0,066
Necesidad lubricación	1	4°	0,066
	<b>15</b>		1,000

**Tabla 4.9.- Matriz de ponderación de criterios para el mecanismo rotacional**

A continuación se asigna a cada criterio un factor de ponderación normalizado dividiendo el número total de decisiones tomadas, como muestra la Tabla 4.10. Posteriormente se reorganizan los criterios colocando en primer lugar aquellos con los coeficientes más altos en la parte superior, enfrentando cada criterio con las posibles soluciones y llegar a adoptar la solución más adecuada.

Se asignarán de nuevo unos porcentajes entre 0 y 100 para indicar en qué medida cada solución cumple con cada criterio particular. Los valores se multiplican por el factor de ponderación de ese criterio particular y al final estos valores se suman para dar un porcentaje total.

Para el mecanismo de desplazamiento rotacional las posibles soluciones adoptadas fueron:

- Engranajes: se trata de ruedas dentadas empleadas para transmitir un movimiento giratorio o alternativo desde una parte de una máquina a otra. Los engranajes se utilizan sobre todo para transmitir movimiento giratorio, pero usando engranajes apropiados y piezas dentadas planas pueden transformar movimiento alternativo en giratorio y viceversa. Permiten transmitir una rotación entre dos ejes con una relación de velocidades angulares constante. Tienen la ventaja de ser sencillos de construir y permitir la transmisión de grandes potencias.

- Poleas con correas: transmite un movimiento giratorio de un eje a otro, pudiendo modificar sus características de velocidad y sentido. Este sistema de transmisión de movimientos tiene ventajas como el bajo coste o el funcionamiento silenciosos, pero su principal desventaja consiste en que cuando la tensión es muy alta la correa puede llegar a salirse de la polea, lo que aumenta la frecuencia de averías.
- Ruedas de fricción: sistema que consiste en dos ruedas solidarias con sus ejes, cuyos perímetros se encuentran en contacto directo, pudiendo transmitirse el movimiento de una a otra mediante fricción. Presentan el inconveniente de no permitir transmitir grandes esfuerzos.
- Tornillo sin fin: es un mecanismo diseñado para transmitir grandes esfuerzos, y como reductores de velocidad aumentando la potencia de transmisión. Tiene la desventaja de no ser reversible el sentido de giro, sobre todo en grandes relaciones de transmisión y de consumir en rozamiento una parte importante de la potencia.

		Alternativas propuestas							
Criterios	Ponderación	Engranajes		Poleas con correas		Ruedas de fricción		Tornillo sin fin	
		% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación	% Asignado	Puntuación
Transmisión de potencia	0,333	90	29,97	80	26,64	30	9,99	80	26,64
Inversión sentido giro	0,266	100	26,60	100	26,60	100	26,60	0	0
Averías	0,200	70	14	30	6	60	12	60	12
Necesidad de lubricación	0,066	50	3,30	100	6,60	50	3,30	50	3,30
Ruido	0,066	70	4,62	70	4,62	60	3,96	60	3,96
Costes	0,066	70	4,62	80	5,28	60	3,96	50	3,30
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>83,11</b>		<b>75,74</b>		<b>59,81</b>		<b>49,20</b>	

Tabla 4.10.- Matriz de selección de conceptos para el mecanismo rotacional

De acuerdo a los resultados, el mecanismo recomendado para producir el movimiento rotacional es el de la utilización de engranajes.

Por tanto, en el presente capítulo se ha expuesto una metodología para la selección de conceptos considerando diferentes criterios para su evaluación. Está claro que se trata de un método con un cierto componente de subjetividad, y que considera cada componente de manera individual, y no todo el sistema global. Por ello un aspecto a considerar es que todos los mecanismos seleccionados se puedan integrar como un conjunto.

En cualquier caso, aunque pueden existir otras metodologías, los conceptos aquí expuestos pretenden ser un método simple que ayuden en la justificación para la selección y posterior diseño detallado del dispositivo.

## 4.5 DESARROLLO DE CONCEPTOS

Con los conceptos principales del dispositivo para ensayos seleccionados, se pasaron a realizar unos bocetos, a mano alzada, de las distintas posibilidades, fundamentalmente, en cuanto a la forma y el modo de disposición en la máquina. Es decir, estos bocetos permitirán encaminar el diseño estético del dispositivo a diseñar.

A continuación se mostrarán algunas de las diferentes soluciones dadas a través de los esbozos iniciales para la máquina de ensayo. Para no cargar en exceso la presente Memoria, en el ANEXO II, se recogen de manera más exhaustiva los diferentes bocetos realizados durante el proceso de diseño del dispositivo, organizados según el orden de realización.

Como se indicó anteriormente, se optó por diseñar la estructura soporte del dispositivo empleando perfiles normalizados de acero estructural. Aunque aún no se haya hecho ningún tipo de evaluación de tensiones, hay que procurar desde el comienzo buscar que la distribución de tensiones en la estructura como consecuencia de la aplicación de cargas sea lo más óptimo posible. Siguiendo estas premisas se planteó diseñar una armazón que en principio fuese de modo similar a como se muestra en la Figura 4.3 y Figura 4.4.

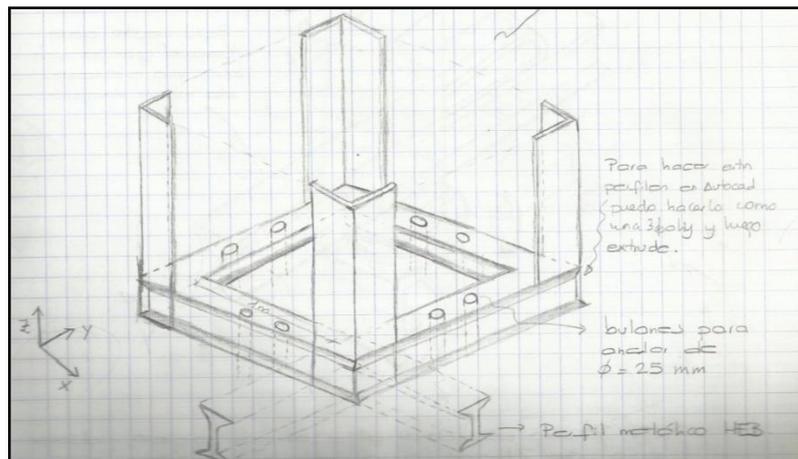


Figura 4.3.- Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte inferior

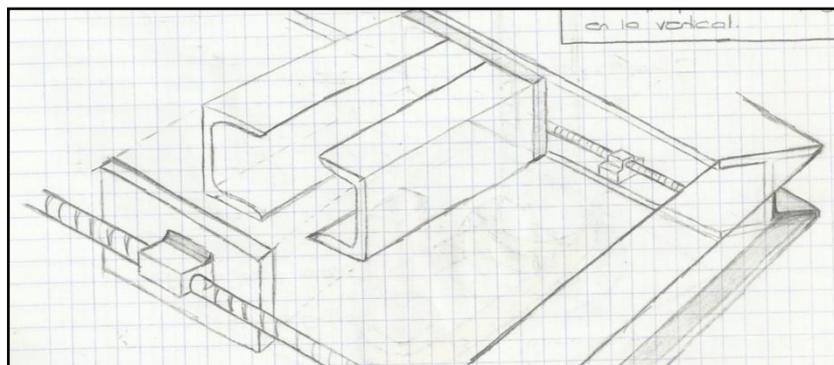


Figura 4.4.- Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte superior

Desde la Figura 4.5 a la Figura 4.10 se muestran algunos bocetos planteados en base a los conceptos seleccionados en el anterior capítulo de la presente memoria respecto a los mecanismos de desplazamiento lineal y rotacional.

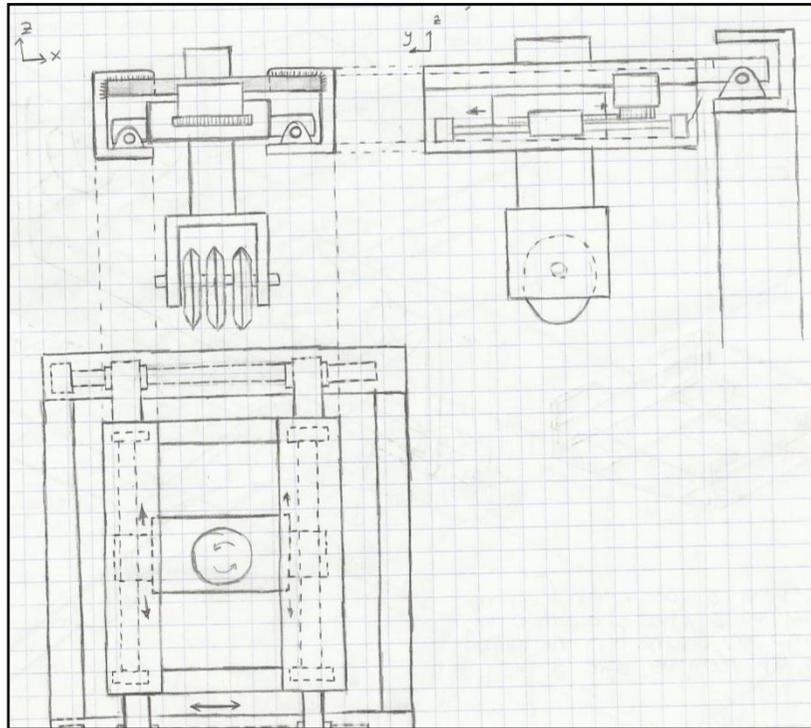


Figura 4.5.- Boceto preliminar con vistas en planta, perfil y alzado del dispositivo

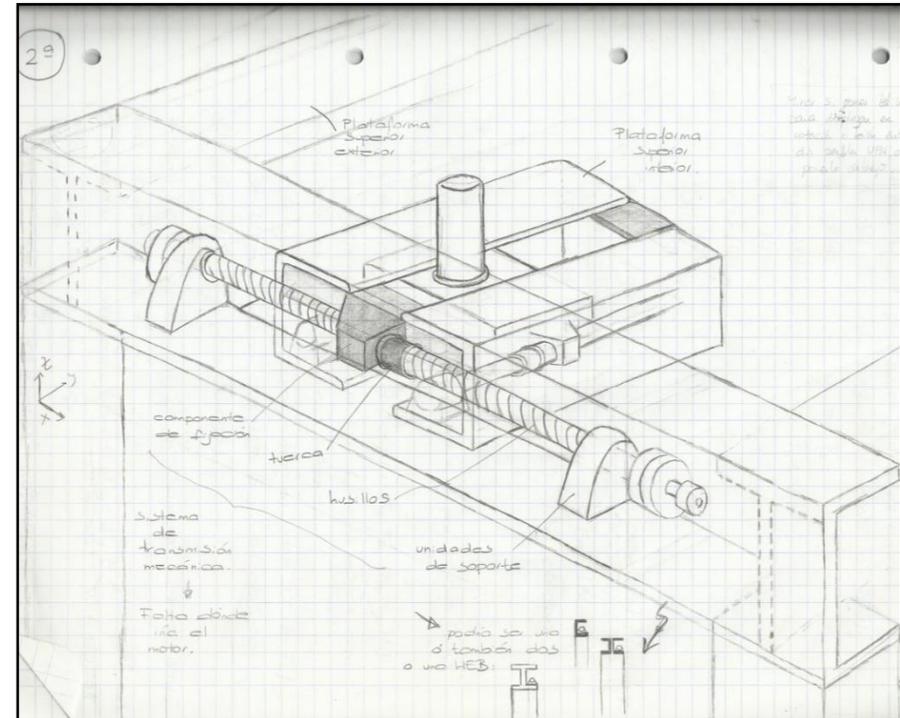


Figura 4.6.- Boceto preliminar con los mecanismos de desplazamiento lineal en el plano horizontal

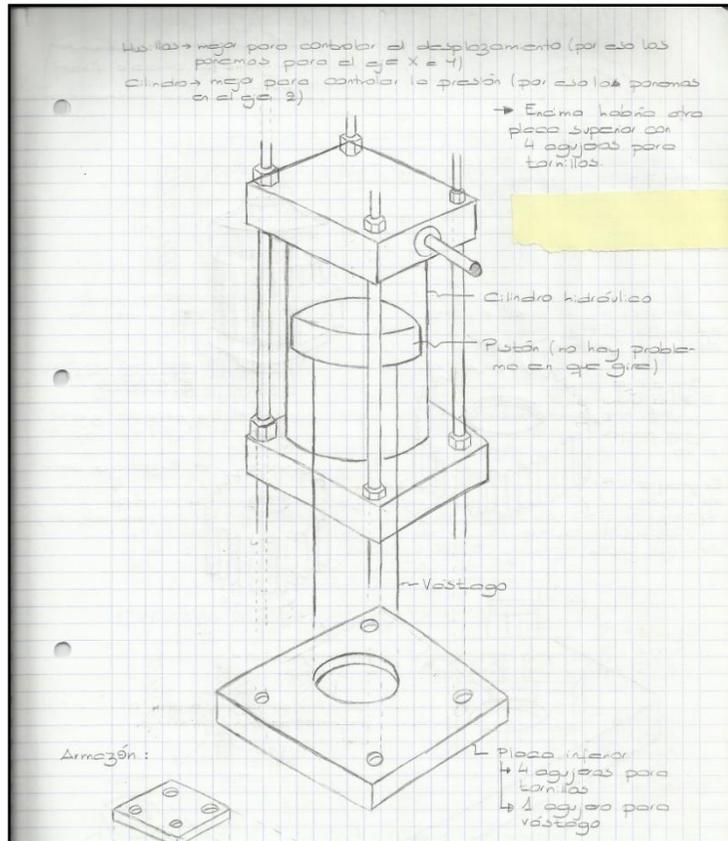


Figura 4.7.- Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento en el plano vertical

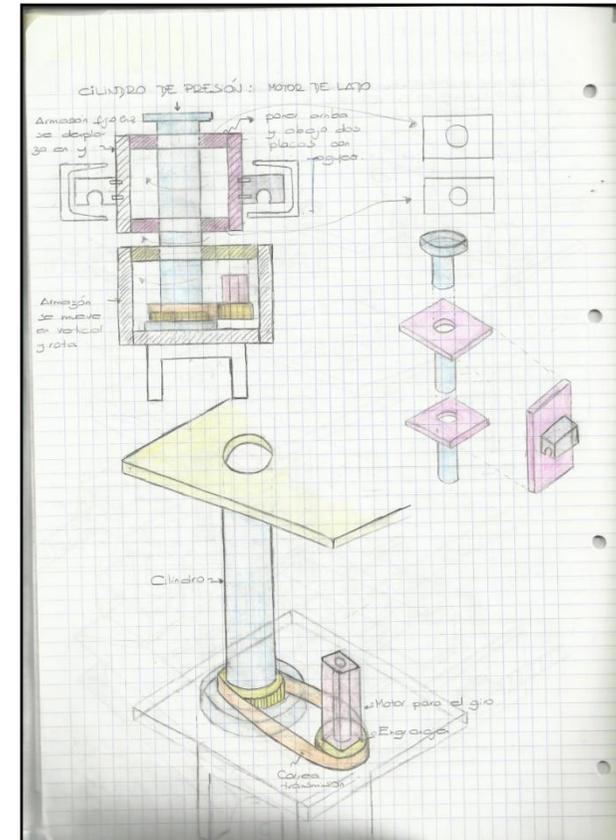


Figura 4.8.- Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento en el plano vertical y mecanismo rotacional

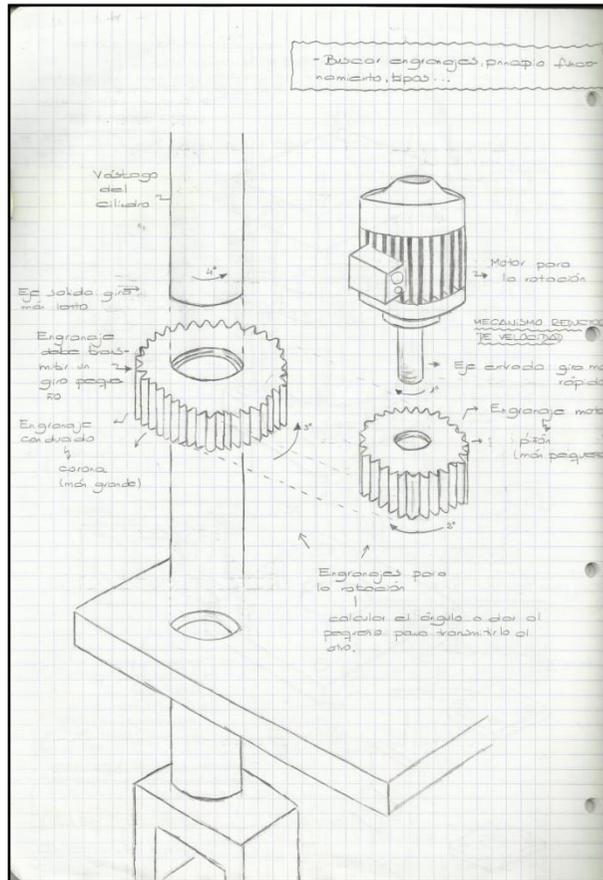


Figura 4.9.- Boceto preliminar con el mecanismo rotacional

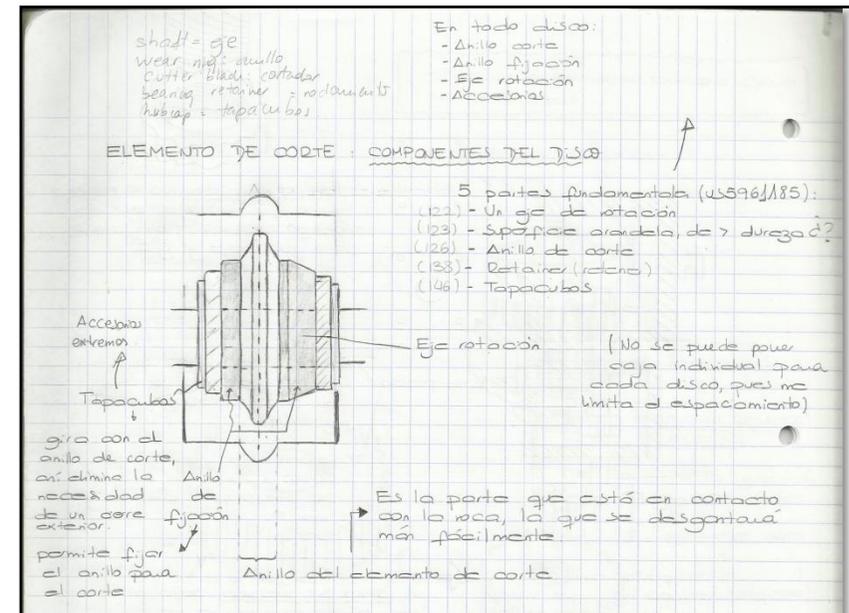


Figura 4.10.- Elemento de corte empleado por el dispositivo de ensayo

Como se ha mencionado, en el ANEXO II se pueden ver más bocetos planteados durante el proceso de diseño del dispositivo.

Una vez planteados los conceptos fundamentales de la máquina, y realizados los primeros esbozos, la siguiente etapa consistirá en realizar análisis más detallados en torno a todos estos conceptos, desde el punto de vista de cálculos para asegurar la estabilidad de todo el conjunto, bien a través de cálculo simples o mediante análisis numéricos a través de programas informáticos.

Además, una vez sentadas las bases principales de la máquina de ensayo, ya se está en disposición de realizar representaciones en dos y tres dimensiones, mediante técnicas más detalladas de diseño asistido por ordenador.

## 4.6 MODELIZACIÓN

A continuación se aplicarán los conceptos explicados en el presente capítulo de Modelización para los aspectos relacionados con el armazón estructural que englobará la máquina de ensayo.

De este modo para la descripción de dicho armazón se hará uso del software AUTOCAD para la representación del modelo a escala, y además, se describirá el procedimiento empleado para el cálculo de la estructura de acero, mediante una simulación con el programa informático FLAC 3D, empleado para calcular los esfuerzos y momentos a los que estará sometida dicha estructura así como una aproximación de los factores de seguridad que garanticen la estabilidad de la misma.

Además los valores obtenidos con FLAC serán utilizados para hacer una segunda comprobación del factor de seguridad mediante un cálculo clásico con el fin de compararlos y corroborar la seguridad de la estructura.

El resto del dispositivo, en lo que a componentes se refiere y modo representación, se llevó a cabo igualmente con el programa AUTOCAD, pero se expondrán con más detenimiento en el siguiente capítulo de Diseño de Detalle.

### 4.6.1 ARMAZÓN DE LA MÁQUINA

En primer lugar es necesario señalar que se aplicará el concepto de eje a las direcciones de los diferentes desplazamientos de las partes móviles en la máquina, como puede ser el cabezal que se mueve en la vertical, la estructura para el desplazamiento transversal o para el longitudinal. Así pues se denominará:

- Eje X: es el eje en el que se realiza el movimiento longitudinal de la herramienta de corte (disco).
- Eje Y: es el eje en el que se realiza el movimiento transversal de la herramienta de corte.
- Eje Z: es el eje que realiza el movimiento perpendicular de la herramienta de corte hacia la muestra.
- Movimiento de rotación en torno al eje Z que reproduce el giro de la herramienta de corte.

Por tanto se tendrán tres ejes de traslación: dos de ellos X e Y se asocian al movimiento en el plano horizontal (longitudinal y transversal) de la zona de trabajo, otro eje Z para el desplazamiento vertical del cabezal de la máquina, junto con un movimiento rotacional en torno a un ángulo  $\theta$  para el giro de la herramienta de corte. A continuación se desarrollará cómo es la disposición de la estructura, formada por varios perfiles de acero simples, que deben de unirse entre sí para resistir conjuntamente, de modo que las uniones transmitan las fuerzas de unos elementos a otros.

#### Perfiles de acero estructural:

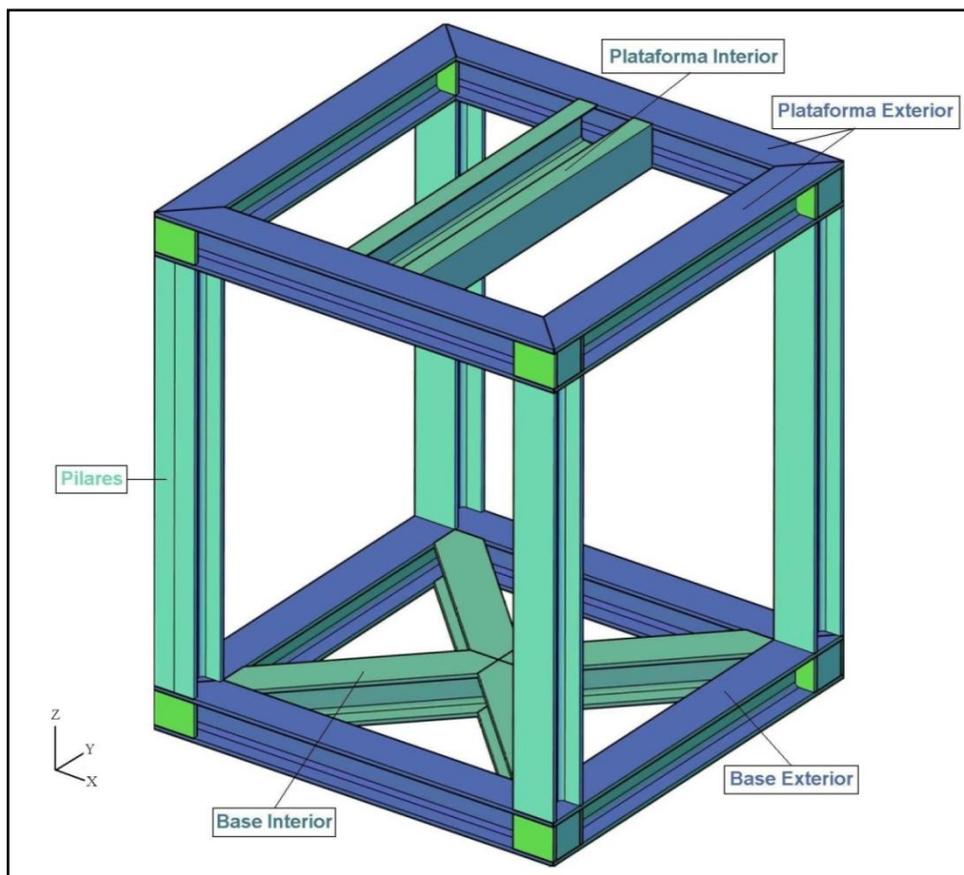
En base a la disposición de los ejes de movimiento se ha diseñado el armazón estructural en el que estará alojada la máquina-herramienta. De aquí en adelante, para la designación de los perfiles se empleará una nomenclatura basada en la diferenciación de “Base” para los perfiles de la parte inferior y “Plataforma” para los perfiles de la parte superior, así como “Exterior” e “Interior” según la posición que ocupen en la estructura.

Este armazón está constituido por perfiles de acero normalizado del tipo S275 (según la norma UNE EN 10025) distribuidos a modo de vigas y pilares de 1,20 m de

longitud como máximo. Se diferencian dos tipos de perfiles:

- HEB-120 para la Base Exterior y Base Interior, Pilares y Plataforma Exterior.
- UPN-120: se disponen en la Plataforma Interior.

En la Figura 4.11 se puede observar la denominación de cada perfil estructural.



**Figura 4.11.- Denominación de los perfiles estructurales**

El cálculo correspondiente para la elección de estos perfiles se adjunta en los Apartados 4.6.2 y 4.6.3 del presente Proyecto Fin de Máster.

Los mecanismos necesarios para el desplazamiento según los diferentes ejes se disponen en las siguientes partes del armazón:

- Para el eje X se dispone en la Plataforma Exterior, es decir, contenido en perfiles HEB-120.
- Para el eje Y en la Plataforma Interior, es decir, en perfiles UPN-120.

- Para el eje Z y el movimiento de rotación, en la estructura que está situada entre los dos perfiles UPN-120 en la Plataforma Interior.

#### Uniones entre perfiles:

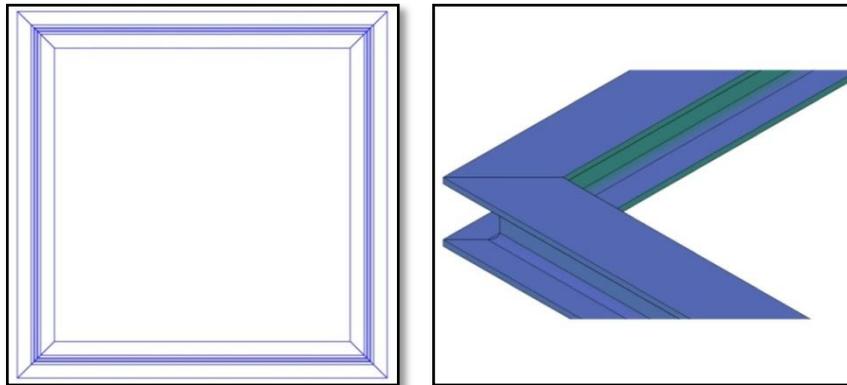
Los perfiles de acero tienen que estar perfectamente unidos de forma que permitan conseguir el nivel de seguridad proyectado, buen comportamiento en servicio y durabilidad, y deben ser capaces de resistir al menos los esfuerzos previstos para ellas en el análisis global de la estructura. Evidentemente es fundamental conseguir una unión eficaz, pues de otro modo se podría producir el fallo de la estructura y además conviene proyectar dichas uniones de forma que sean de fácil y segura ejecución.

En este sentido el objetivo principal de la unión es el de asegurar la mejor continuidad de las piezas, continuidad que será más perfecta cuanto más uniforme sea la transmisión del esfuerzo. Por ello se ha planteado por una parte la unión entre perfiles y por otra parte a través de conjuntos de piezas de unión capaces de soportar los esfuerzos que se transmiten entre piezas.

Se llama soldadura a la unión de dos piezas metálicas de igual o parecida composición, de forma que la unión quede rígida y estanca. Esto se consigue bien por el efecto que proporciona la aportación de calor, o bien por la aportación de otro metal de enlace o por la combinación de ambos efectos. Existen multitud de sistemas de soldar, pero el más importante para soldaduras metálicas es el sistema de soldadura por fusión. En las soldaduras por fusión el calor proporcionado funde los extremos de las piezas y al solidificarse se produce la unión. Hay diferentes tipos de soldadura por fusión, pero normalmente el más empleado para estructuras metálicas es la soldadura por arco eléctrico. A modo general, este tipo de soldadura consiste en unir dos piezas metálicas al provocar un arco eléctrico entre ellas creado por una corriente eléctrica y un electrodo que constituye el metal de aportación. En España los procedimientos y especificaciones que rigen todo lo referente a soldadura sobre estructuras metálicas y todas sus técnicas viene recogido en las normas UNE-14: Soldadura y Técnicas conexas. Según todo esto, la disposición del armazón estructural, será el siguiente:

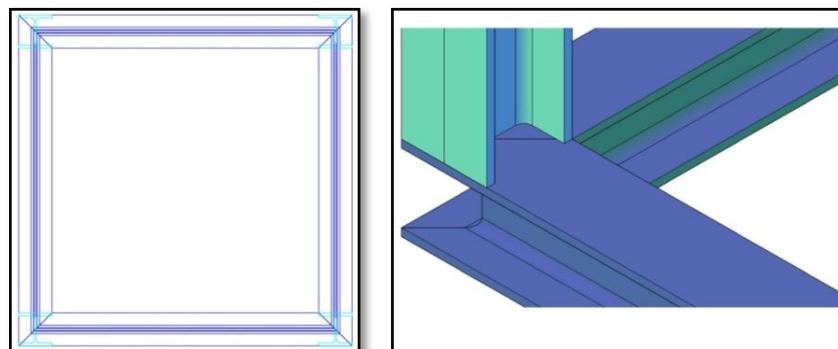
- La Base Exterior consta de cuatro perfiles HEB-120 cada uno de los cuales se cortará a 45° en sus extremos para soldarse en alas y alma al perfil

adyacente y así conformar una estructura cuadrangular, como se puede ver en la Figura 4.12. En dicha figura a su vez, se aprecia en detalle cómo se consigue la unión en alas y alma entre dichos perfiles.



**Figura 4.12.- Base Exterior en planta (izquierda) y detalle de la estructura (derecha)**

- Los cuatro Pilares, de perfiles HEB-120, están situados sobre las esquinas de la Base Exterior cuadrangular. Se dispondrán de tal manera que en sus extremos estén soldados en alas y alma tanto a la Base como a la Plataforma. En la Figura 4.13 se puede ver la disposición de los Pilares.



**Figura 4.13.- Base Exterior y Pilar en planta (izquierda) y detalle de la estructura (derecha)**

El problema de apoyarse en la Base Exterior de este modo es que las tensiones no se transmiten perfectamente ya que debajo de las alas de los Pilares queda una zona hueca. Así pues, es necesario diseñar unas piezas de rigidización que actúen como una prolongación de los pilares en las HEB que constituyen la Base Exterior y que soporten los esfuerzos que se transmiten en la estructura. Como se puede ver en la Figura 4.14, en cada una de las esquinas se dispondrán tres piezas de acero debajo de cada uno de los cuatro Pilares: una de ellas paralela al alma y ala del Pilar (a), otra

paralela al otro ala (b) y una tercera que permitiría soldar las dos anteriores para mayor seguridad de la estructura (c).

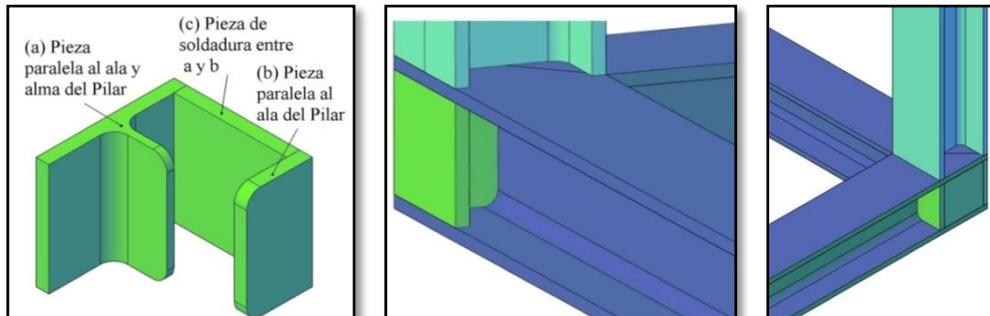


Figura 4.14.- Piezas de unión entre el Pilar y la Base Exterior (izquierda) y detalles de la unión

- La Base Interior consta de cuatro perfiles HEB-120 que están cortados en sus extremos en ángulo recto según el punto central. Esto permite que en la zona central, puedan soldarse entre sí en alas y alma, y en el extremo opuesto que estén unidas en las alas con la Base Exterior. En la Figura 4.15 se muestra uno de estos perfiles así como la unión entre ellos y la Base Exterior de la estructura.

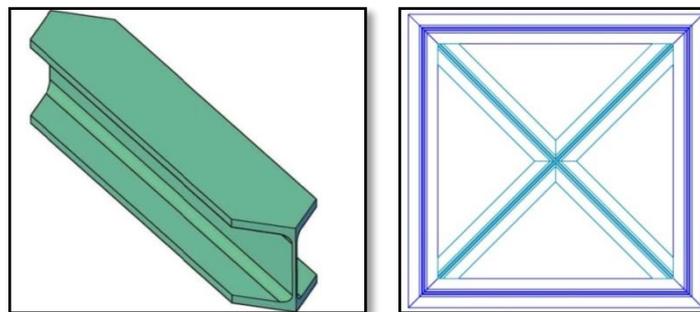


Figura 4.15.- Perfil empleado para la Base Interior (izquierda) y vista en planta de la Base Exterior e Interior (derecha)

El problema, es que quedaría el alma de la Base Interior sin soldar. Una solución podría consistir en prolongar todo el perfil HEB de la Base Interior y ajustarlo según la morfología de la Base Exterior, pero hacer esto resultaría costoso. Sería mejor cortar en ángulo recto como se ha planteado y aparte hacer cuatro nuevas piezas para reforzar la soldadura.

En la Figura 4.16 se puede ver la morfología que tendrían estas piezas así como su situación en la estructura.

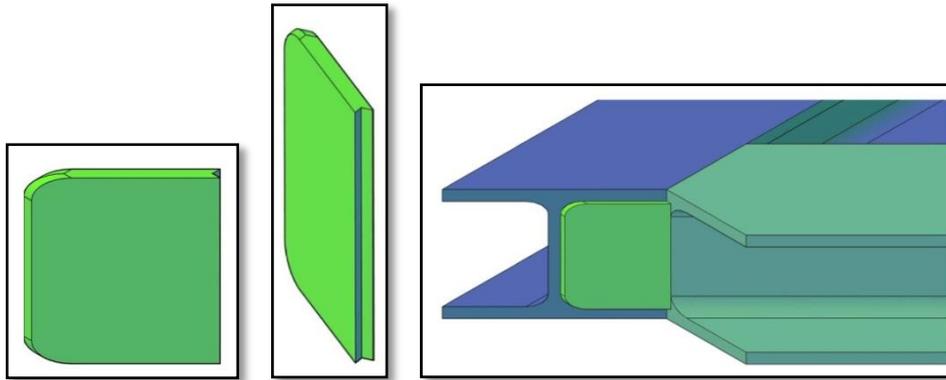


Figura 4.16.- Piezas para soldar el alma de la Base Interior con la de la Base Exterior

- En cuanto a la parte superior de la estructura será de similares características que la parte inferior, es decir, la Plataforma al igual que la Base Exterior, constará de cuatro perfiles HEB-120 cada uno de los cuales se encuentran cortados a 45° en sus extremos para soldarse en alas y alma al perfil adyacente y así conformar la estructura cuadrangular. Habría igualmente unas piezas para transmitir uniformemente los esfuerzos entre los Pilares y la Plataforma Exterior (que serían idénticas a las que se explicaron para la parte inferior) y además se añadiría otra paralela ala, como se puede ver en la Figura 4.17 y lo único que difiere es que aquí no habría unas piezas como las que se utilizaron para prolongar el alma de la Base Interior. Por último la Plataforma Interior, constituida por dos perfiles UPN-120, estarán unidos entre sí en sus extremos por unas piezas a modo de placas de acero que permite soldar ambos perfiles en alas y alma, como se puede ver en la Figura 4.18.

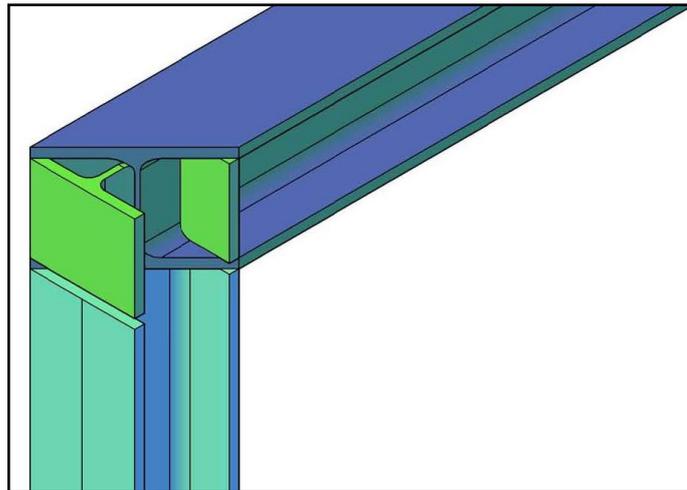


Figura 4.17.- Detalle de la parte superior del armazón

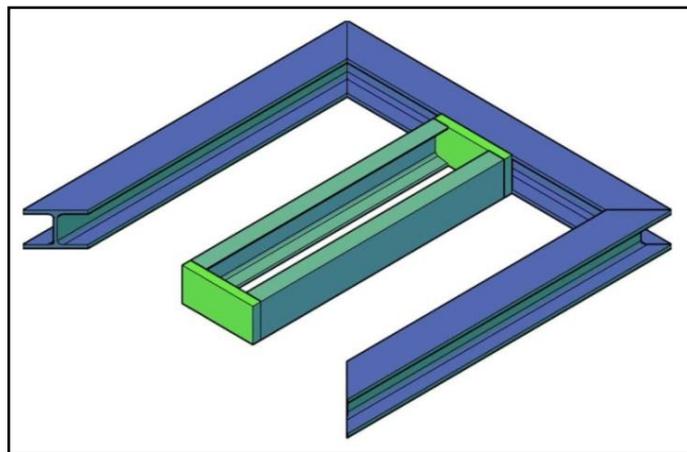


Figura 4.18.- Detalle de la unión entre perfiles UPN-120 de la Plataforma Interior

#### 4.6.2 MODELIZACIÓN POR MÉTODOS NUMÉRICOS (FLAC 3D)

Una manera de analizar y estudiar el comportamiento de un diseño estructural consiste en la realización de una modelización con una aplicación informática que, basándose en métodos numéricos, permite simular la geometría y propiedades de las estructuras, para determinar la estabilidad del modelo, al menos teóricamente, y establecer cuantitativamente los esfuerzos que soportaría la estructura diseñada en base a las cargas que soportará.

Partiendo de la geometría del modelo, propiedades de la estructura y condiciones de contorno, los métodos de análisis numéricos son capaces de simular, cómo es la distribución de esfuerzos en una estructura cuando se altera su equilibrio con cargas

externas. Del mismo modo, como resultado de todo ello, los programas facilitan la información correspondiente, tanto gráfica como numérica, de aquellos parámetros que en cada caso se consideren oportunos.

A continuación se describirá brevemente el principio de funcionamiento que emplea este programa informático FLAC 3D para el diseño de los elementos estructurales que permitan la realización del cálculo estructural.

### ❖ Geometría del modelo

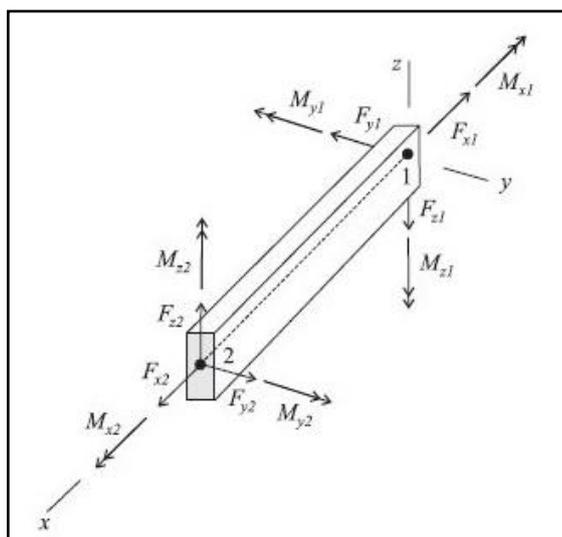
En primer lugar es necesario definir la estructura a modelizar. FLAC3D puede modelizar la respuesta estructural de un sistema mecánico que está constituido por un sólido continuo y un esquema de cargas actuando. El sólido continuo está representado por un conjunto de *zonas* con formas poliédricas, cada una asociada a *puntos de mallado*. El armazón o esquema está representado por un conjunto de elementos estructurales y que están asociados a su vez a los *nodos*. Este armazón interactúa con el sólido continuo mediante *enlaces* que conectan los nodos a las zonas (no solamente a puntos de mallado) o a otros nodos.

En el caso de elementos estructurales a modo de barras o vigas, se trata de elementos finitos definidos por sus propiedades geométricas y materiales. Están constituidos por dos nodos y se asume que es un segmento recto con propiedades uniformes en las secciones entre dos puntos nodales. Por defecto, cada viga se comporta como un elemento estructural isótropo, linealmente elástico sin límite de rotura; sin embargo, se puede especificar un límite plástico o bien introducir la localización de un punto plástico a través del cual puede desarrollarse una discontinuidad durante la rotación o giro. Todo ello es adecuado para modelar vigas estructurales con desplazamientos causados por las deformaciones transversales y longitudinales de las secciones representativas.

Las vigas pueden relacionarse estrictamente a un mallado de tal modo que las fuerzas y los momentos de flexión desarrollados dentro de las vigas van cambiando a medida que se deforma el mallado, pudiendo actuar tanto cargas puntuales como cargas distribuidas. Las vigas se emplean para modelar elementos estructurales y saber dónde

se produce la concentración de resistencia y momentos límites, como podría ser el caso de por ejemplo, sostenimientos puntuales para excavaciones o a modo general, armazones estructurales que pueden tener cargas puntuales o distribuidas.

Cada viga tiene su propio sistema de coordenadas local, como se muestra en la Figura 4.19, que proporciona una descripción de las distribuciones de fuerzas y momentos a través de la sección de una viga.



**Figura 4.19.- Convención de signos adoptada para fuerzas y momentos de las barras**

Este sistema se utiliza para especificar los momentos de inercia en las secciones transversales, así como las cargas aplicadas, y para adoptar una convención de signos para la distribución de fuerzas y momentos a través de las vigas. El sistema de coordenadas está definido por la localización de sus dos puntos nodales, nombrados 1 y 2 en la Figura 4.19, y por el vector  $Y$ . Este sistema está definido por:

- ❖ El eje del centroide coincide con el eje  $X$ .
- ❖ El eje  $X$  está dirigido desde el nodo 1 al nodo 2.
- ❖ El eje  $Y$  está alineado con la proyección del vector  $Y$  en el plano atravesado transversalmente (por ejemplo, el plano cuya normal se dirige a lo largo del eje  $X$ )

Por tanto se tienen seis grados de libertad por nodo: tres componentes traslacionales y tres rotacionales. Para cada desplazamiento (traslación y rotación)

mostrado en la figura, hay una fuerza correspondiente (fuerza y momento). La matriz de rigidez de la viga incluye los seis grados de libertad de cada nodo para representar la acción axial, transversal y giros dentro de una viga estructural.

### ❖ Propiedades de los elementos estructurales

Según el modelo seleccionado, se necesitan definir una serie de parámetros, que en el caso de vigas estructurales son los siguientes:

- ❖ Densidad  $\rho$
- ❖ Módulo de Young  $E$
- ❖ Coeficiente de Poisson  $\nu$
- ❖ Tensión de fluencia del acero
- ❖ Área
- ❖ Momento respecto al eje Y,  $I_y$
- ❖ Momento respecto al eje Z,  $I_z$
- ❖ Módulo de torsión de la sección,  $I_t$
- ❖ Módulo resistente de la sección respecto a Y,  $W_y$
- ❖ Módulo resistente de la sección respecto a Z,  $W_z$

El material está descrito por las cuatro primeras propiedades, la geometría en sección está descrita por el resto de propiedades.

### ❖ Condiciones de contorno

Con las condiciones de contorno se fijan o limitan, fundamentalmente, los desplazamientos de los nodos situados en los límites del modelo. Por ejemplo, los nodos que están situados en los extremos de la base de la estructura van a tener impedido su movimiento en el eje Z, pues éstos puntos no se encontrarían libres, sino simplemente apoyados. Y además uno de estos nodos permanece fijo en X, Y, Z, impidiendo por tanto su desplazamiento en el espacio.

### ❖ Descripción del proceso de cálculo

Una vez definida la geometría del problema, las propiedades de los elementos estructurales y condiciones de contorno, ya se está en disposición de iniciar el proceso de cálculo. Se describe a continuación dicho proceso para el modelo tridimensional.

A cada barra se le asignan una serie de propiedades tal como se ha indicado y se definen de acuerdo a su orientación respecto a un sistema coordinado global. A continuación se asignarán a los nodos que correspondan las fuerzas que actuarán directamente sobre ellos y fijando las condiciones de contorno que se consideren necesarias. Como consecuencia de estas cargas externas, en cada nodo se desarrollará un sistema de esfuerzos (axil  $F_x$ ; cortante en el eje Y  $F_y$ ; cortante en el eje Z  $F_z$ ) y momentos (torsor  $M_x$ , flector en el eje Y  $M_y$ , flector en el eje Z  $M_z$ ) que condicionarán la estabilidad de la estructura.

Con FLAC 3D se asume que las vigas se comportan de modo elástico hasta alcanzar el momento plástico. Esta asunción es razonable para las secciones simétricas de acero, como sucede en este caso, porque la diferencia entre dichos modos no es muy grande. Una vez que se tiene la distribución de esfuerzos y momentos en la estructura, así como las propiedades asignadas para cada barra, ya es posible la determinación del factor de seguridad de cada barra, que se definirá en el eje Y como:

$$FS = \min(FS_y, FS_z)$$

donde:

$$FS_y = \frac{\sigma_f}{\sigma_{ry}}$$

$$\sigma_{ry} = \frac{1}{2} \left( \sigma_{fy} + \sqrt{\sigma_{fy}^2 + 4\tau_y^2} \right)$$

$$\sigma_{fy} = \frac{F_x}{A} + \frac{M_z}{W_z}$$

$$\tau_y = \frac{4}{3} \times \frac{F_y}{A}$$

Y de forma análoga según el eje Z:

$$FS_z = \frac{\sigma_f}{\sigma_{rz}}$$

$$\sigma_{rz} = \frac{1}{2} \left( \sigma_{fz} + \sqrt{\sigma_{fz}^2 + 4\tau_z^2} \right)$$

$$\sigma_{fz} = \frac{F_x}{A} + \frac{M_y}{W_y}$$

$$\tau_z = \frac{4}{3} \times \frac{F_z}{A}$$

siendo  $\sigma_f$  la tensión de fluencia de acero; A la sección transversal de la barra;  $W_y$  el momento resistente de la sección respecto del eje Y;  $W_z$  el momento resistente de la sección respecto al eje Z. Cuando el factor de seguridad obtenido se encuentre por debajo de 1, la estructura no será estable, por lo que será adecuado llevar a cabo una serie de pruebas con diferentes perfiles de acero variando por tanto las propiedades asignadas a cada una de las barras a fin de obtener una distribución lo más óptima posible en términos de estabilidad y uniformidad de la estructura.

### ❖ Descripción del modelo

Se ha elaborado un modelo representativo en base a las propiedades del material empleado (acero) y las dimensiones de la estructura, mediante la modelización de una estructura de dimensiones 1,20 m x 1,20 m x 1,20 m constituida por un conjunto de vigas y pilares, tal como se muestra en la Figura 4.20. A efectos de cálculo se considerarán todos los elementos estructurales como vigas para simplificar el procedimiento. El modelo de FLAC 3D consiste en 150 barras, distribuidas del modo en que se recoge en la Tabla 4.11:

Denominación de las barras en la estructura	Número de barra
Barras de la Base Exterior	1 a 40
Barras de la Base Interior	41 a 60
Barras de los Pilares	61 a 100
Barras de la Plataforma Exterior	101 a 140
Barras de la Plataforma Interior	141 a 150

Tabla 4.11.- Denominación de barras en la estructura

Cada una de las barras se ha creado especificando la posición que ocupan los nodos de inicio y final de cada una de las barras de acuerdo a un sistema de coordenadas cartesianas X, Y, Z. Las condiciones de contorno que corresponden al comportamiento teórico de la viga, se imponen a los 4 nodos de las esquinas de la base de la mesa: el nodo 1 tiene impedido el movimiento en X y Z; mientras que los otros tres nodos tienen impedido su movimiento sólo en el eje Z.

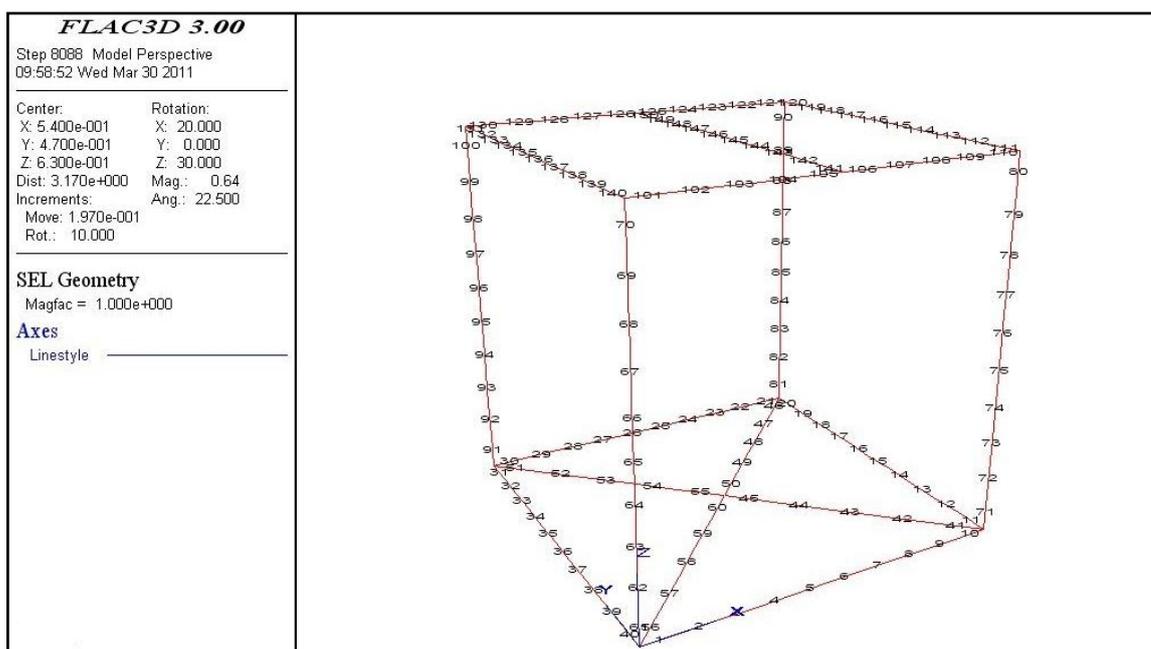


Figura 4.20.- Definición de las barras de la estructura

La estructura modelizada con FLAC 3 D presenta dos cargas que se aplican en el centro de la estructura (una dispuesta en el centro de las barras de la Base Interior; y la otra en el centro de las barras de la Plataforma Interior) por ser considerada la situación más desfavorable en términos de estabilidad. La localización de estas barras se puede apreciar en la Figura 4.21, y cuantitativamente según los ejes X, Y, Z la magnitud de estas cargas es:

$$F_{superior} = (14,14, \quad -14,14, \quad 60,00) \text{ kN}$$

$$F_{inferior} = (-14,14, \quad 14,14, \quad -75,00) \text{ kN}$$

Estas cargas se han establecido siguiendo las especificaciones del dispositivo, puesto que las fuerzas máximas de aplicación en dirección vertical deberían ser de 60

kN. Además, se ha considerado algo más que la décima parte de la fuerza vertical para la fuerza de corte, principalmente con el objetivo de modelizar una estructura que soporte más cargas a efectos sobreestimación por seguridad. En cuanto a la carga de 75 kN en la parte inferior se debe a la consideración del peso de la propia estructura, que deberá ser mayor que en la parte superior.

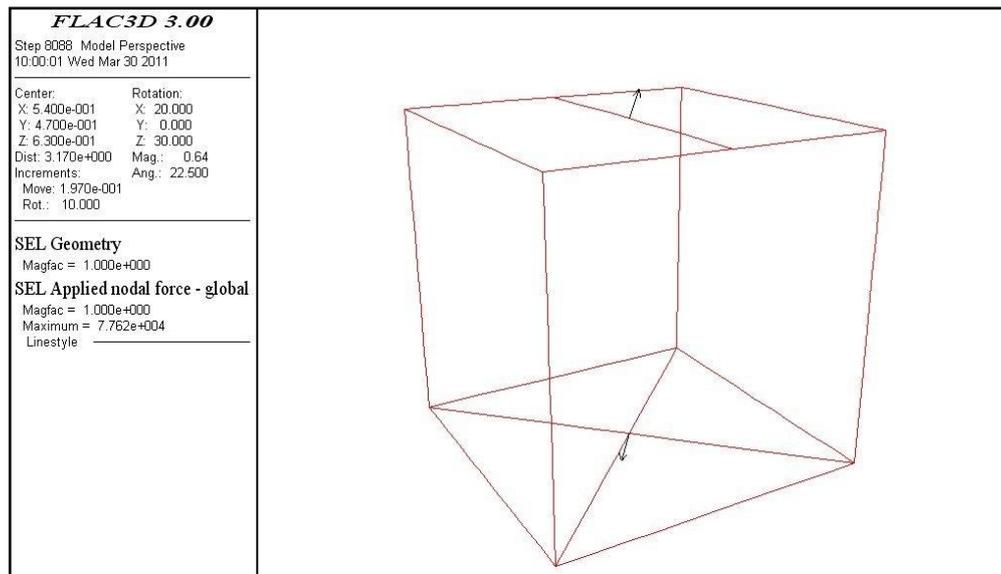


Figura 4.21.- Cargas aplicadas

Las propiedades que se asignan a la estructura se exponen en la Tabla 4.12:

Parámetro	Valor
Densidad (kg/cm <sup>3</sup> )	7500
Módulo de Young (GPa)	200
Coefficiente de Poisson	0,30
Tensión de fluencia del acero (MPa)	280

Tabla 4.12.- Propiedades de las barras

Para la estructura se han seleccionado perfiles HEB-120 excepto para las barras de la Plataforma Interior, donde se ha optado por la colocación de dos barras de perfil UPN-120. En un principio se barajó la posibilidad de emplear otro tipo de perfiles, haciendo comprobaciones con combinaciones de diferentes tipos de IPN e IPE que daban factores de seguridad altos que permitían ya asegurar la estabilidad de la estructura. Sin embargo, a efectos prácticos se optó por emplear finalmente perfiles HEB-120 para todas las vigas (excepto dicha Plataforma Interior) ya que este tipo de

perfiles resultaban ser los más adecuados en los Pilares, y así se facilitarían la soldadura entre las uniones de las vigas con perfiles similares gracias a la mayor uniformidad que si fuesen combinaciones diferentes. Por otra parte la razón de colocar dos perfiles UPN en la parte interna de la mesa superior es que esta viga será la que soporte mayores esfuerzos, por lo que es necesario colocar dos perfiles más resistentes. Además la propia morfología de esta viga es la que permite una mejor distribución de los elementos que constituirán la máquina.

En la Tabla 4.13 se muestran las características de cada uno de estos dos perfiles:

	HEB-120	UPN-120
Área (cm <sup>2</sup> )	34,00	2 x 17,00
I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )	864,00	2 x 364,00
I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	318,00	2 x 43,20
I <sub>t</sub> (cm <sup>4</sup> )	14,90	7,08
W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	144,00	2 x 60,70
W <sub>z</sub> (cm <sup>3</sup> )	53,00	2 x 11,10

Tabla 4.13.- Valores de perfiles laminados de acuerdo a la NBE-EA-95

### ❖ Resultados obtenidos con FLAC 3D

A continuación se expondrán los resultados obtenidos con el programa informático FLAC 3D. En primer lugar se muestran una serie de figuras que representan cómo es la distribución de esfuerzos en la estructura y posteriormente unos gráficos para mostrar la evolución de los esfuerzos en la zona de mayor sollicitación.

En la Figura 4.22 se visualiza el desplazamiento para la simulación realizada, donde se especifica el valor máximo de desplazamiento obtenido que se produce en el centro de la barra de la Plataforma Interior y corresponde a un desplazamiento de 2,40 mm. En dicha figura se muestra tanto la estructura sin deformar como la geometría deformada, y para poder visualizarlo mejor, se exagera la geometría utilizando un factor de amplificación de 50.

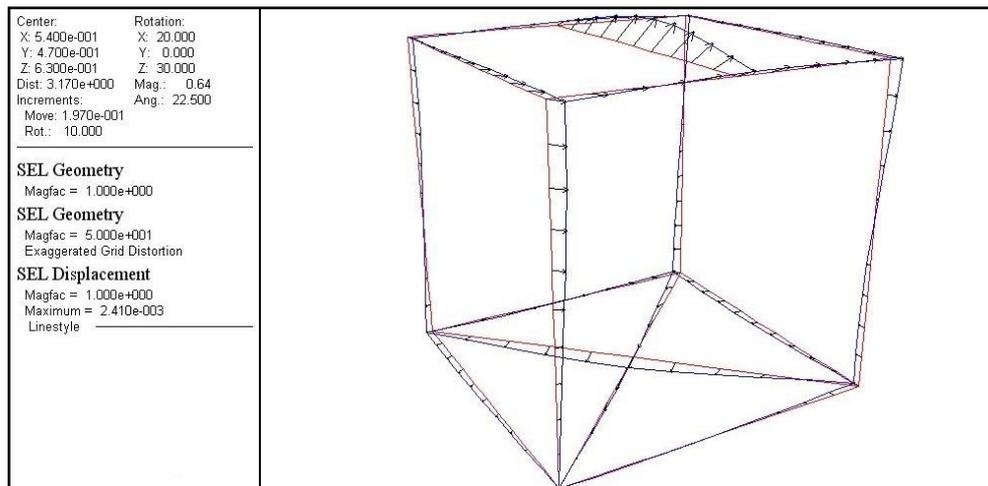


Figura 4.22.- Desplazamientos y deformada de la estructura

Desde la Figura 4.23 a la Figura 4.28 se puede ver cómo es la distribución de esfuerzos (axil, cortante en Y, cortante en Z) y momentos (torsor, flector en Y, flector en Z) en la estructura, que corresponden con la solución teórica. Estos gráficos muestran los resultados empleando como criterio de convención de signos el sistema coordenado de la Figura 4.19.

A grandes rasgos se puede comprobar que, de acuerdo a los resultados que arroja el programa, la estructura se encuentra sometida a esfuerzos fundamentalmente en los Pilares, así como las barras Interiores, tanto de la Base como de la Plataforma. El momento torsor, que está concentrado en las barras de la Plataforma Exterior es de pequeña magnitud (el máximo es 71,70 Nm) en comparación con los esfuerzos y momentos máximos alcanzados en el resto de la estructura. En la Tabla 4.14 se indican los valores máximos de cada uno de los esfuerzos y momentos, así como el punto en que se localizan en la estructura.

	Valor máximo	Nº Barra - Localización en la estructura
Esfuerzo Axil (kN)	21,91	Barras 91 a 99 - Pilares
Esfuerzo cortante en Y (kN)	7,14	Barra 146 - Plataforma Interior
Esfuerzo cortante en Z (kN)	30,01	Barra 146 - Plataforma Interior
Momento torsor (Nm)	71,67	Barra 130 - Plataforma Exterior
Momento flector en Y (kNm)	17,86	Barras 145 a 146 - Plataforma Interior
Momento flector en Z (kNm)	3,89	Barra 71 - Pilar

Tabla 4.14.- Valores máximos de esfuerzos y momentos

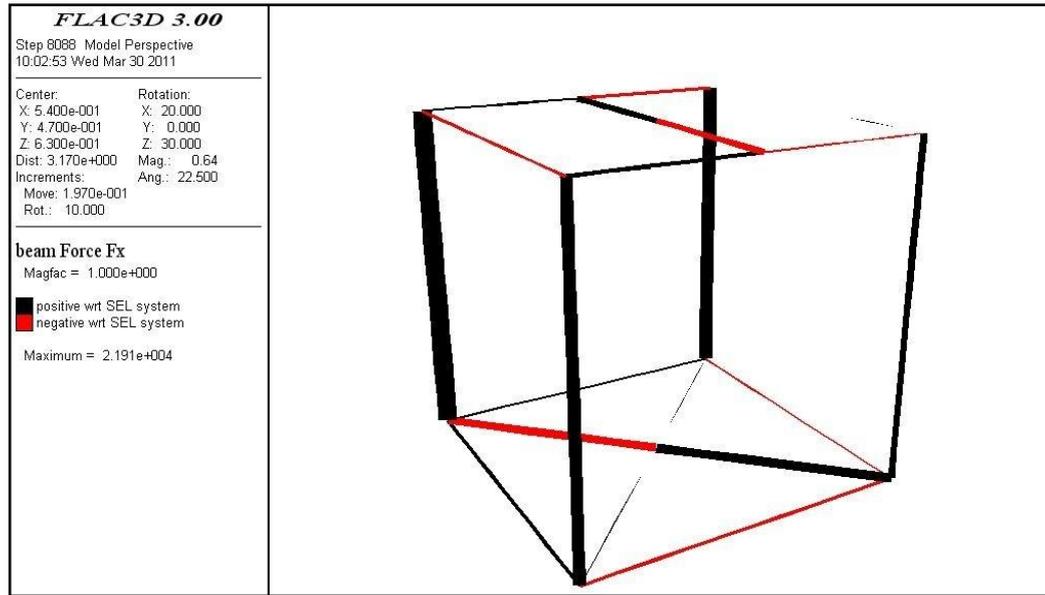


Figura 4.23.- Esfuerzo axial

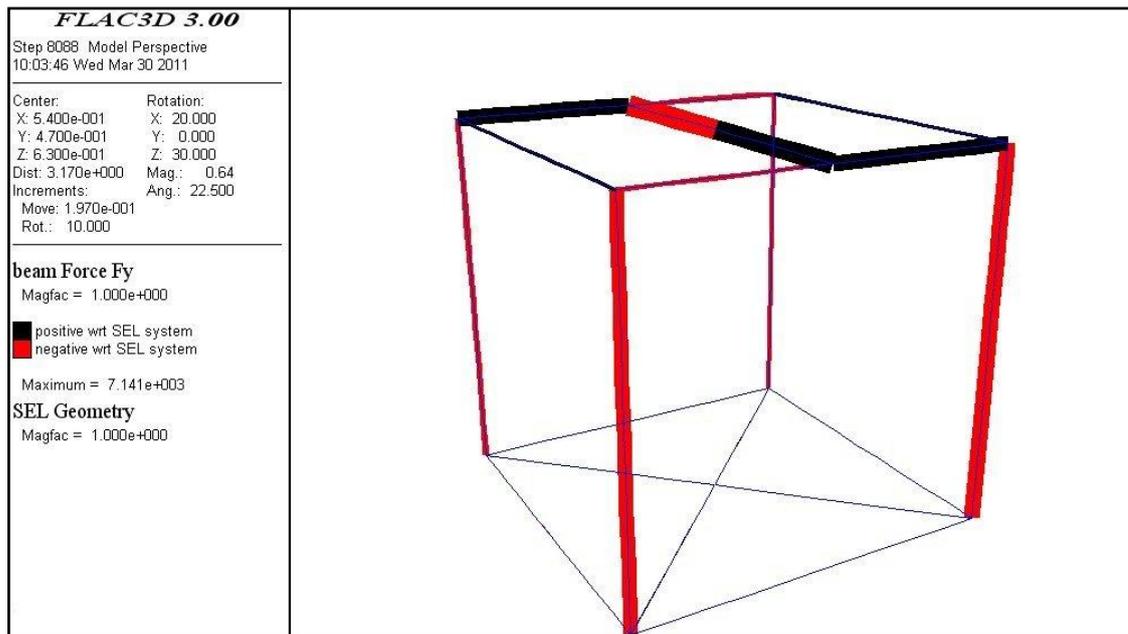


Figura 4.24.- Esfuerzo cortante en Y

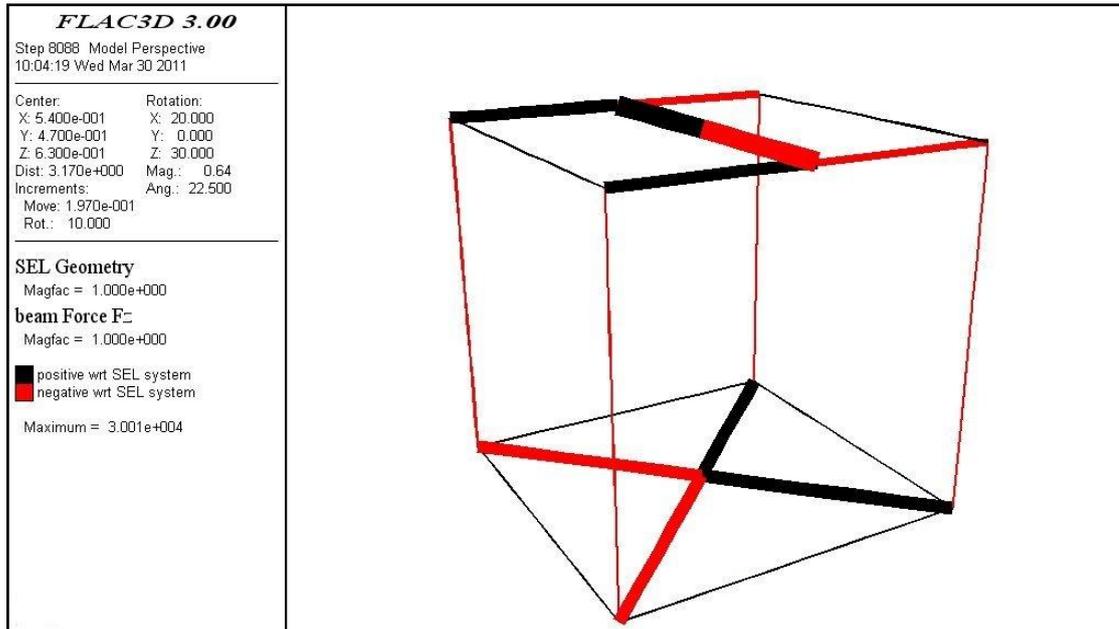


Figura 4.25.- Esfuerzo cortante en Z

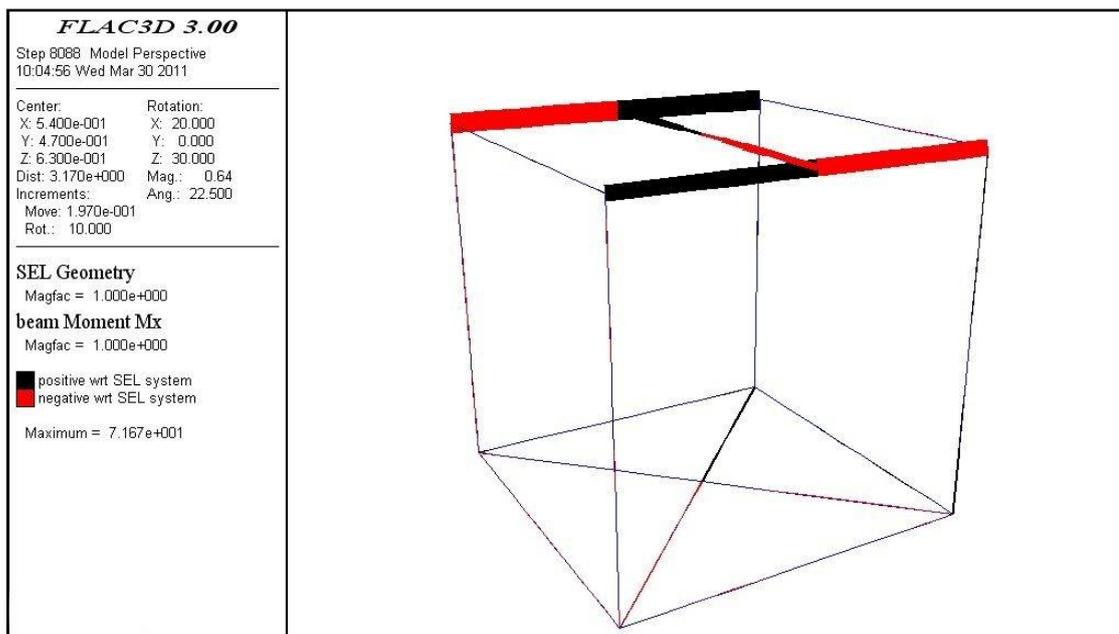


Figura 4.26.- Momento torsor

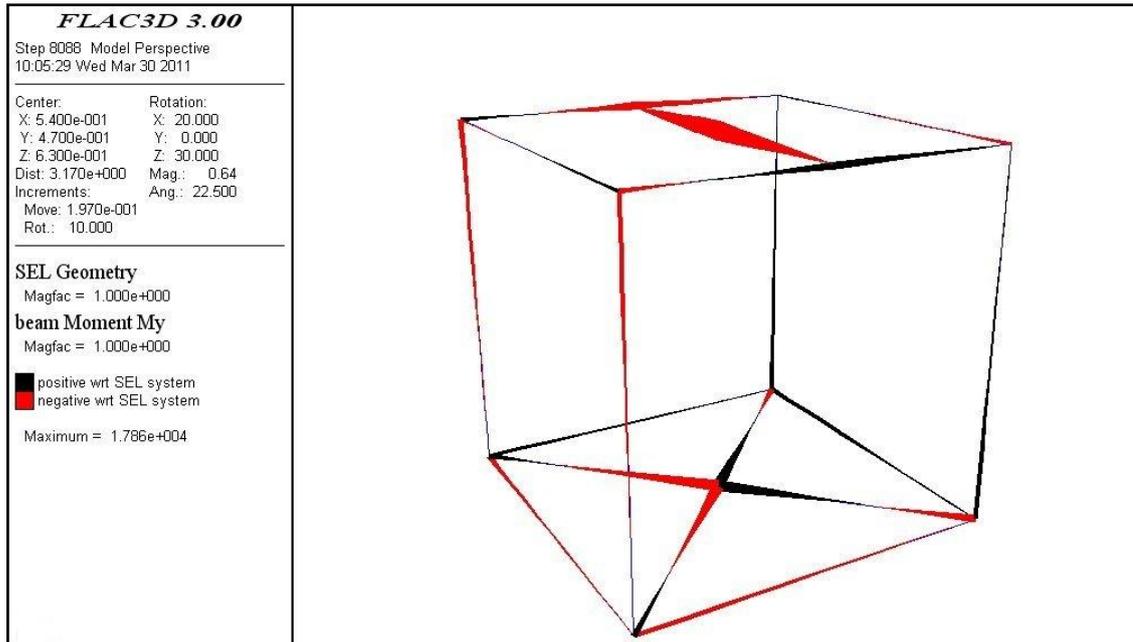


Figura 4.27.- Momento flector en Y

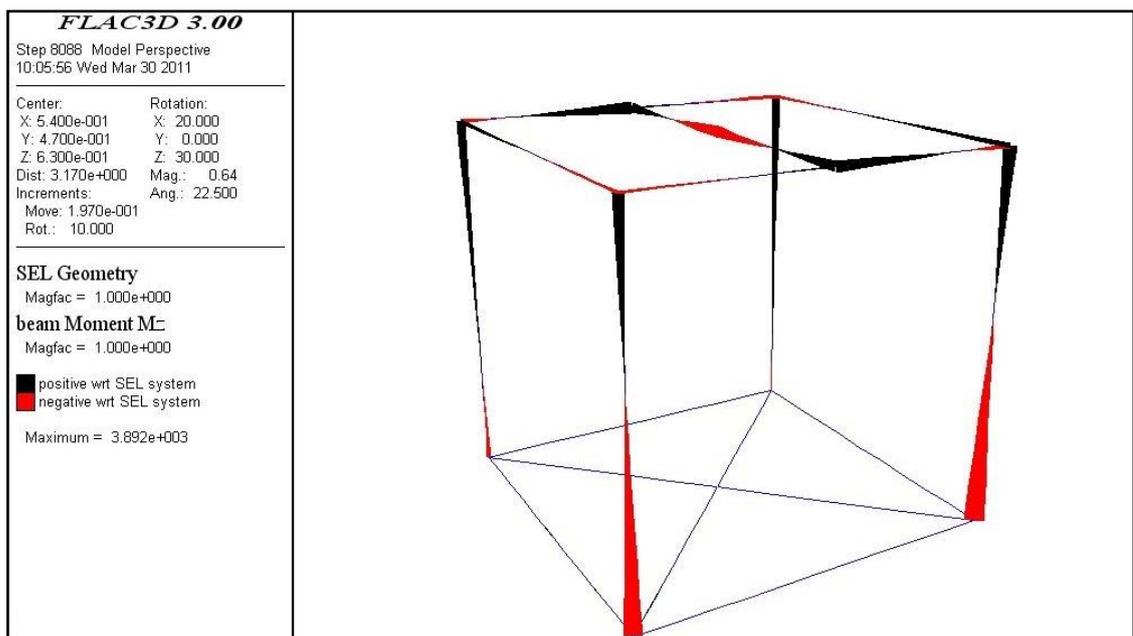


Figura 4.28.- Momento flector en Z

A la vista de los resultados obtenidos, las partes de la estructura que están sometidas a mayores esfuerzos son los Pilares y las barras de la Base y de Plataforma, por ello, se han realizado unos gráficos para analizar con mayor nivel de detalle cómo es la evolución de la flecha en el centro de la base y mesa superior de la estructura y evolución del esfuerzo axial en los pilares. En las Figura 4.29 y la Figura 4.30 se

muestran dichos gráficos respectivamente. La evolución de la flecha, como refleja la Figura 4.29 alcanza un valor estático de 2,01 mm para la parte superior de la estructura (línea negra) mientras que para la base (línea roja) es menor, del orden de 1 mm.

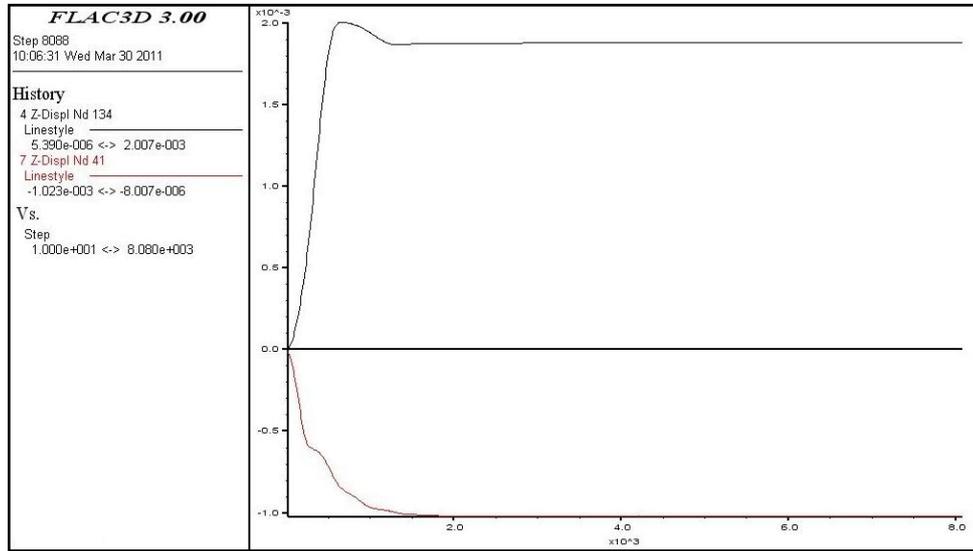


Figura 4.29.- Evolución de la flecha en el centro de la base y parte superior de la mesa

En cuanto al esfuerzo axial en los cuatro Pilares (véase la Figura 4.30) se llega a alcanzar un valor estático entre 14,88 y 21,93 kN.

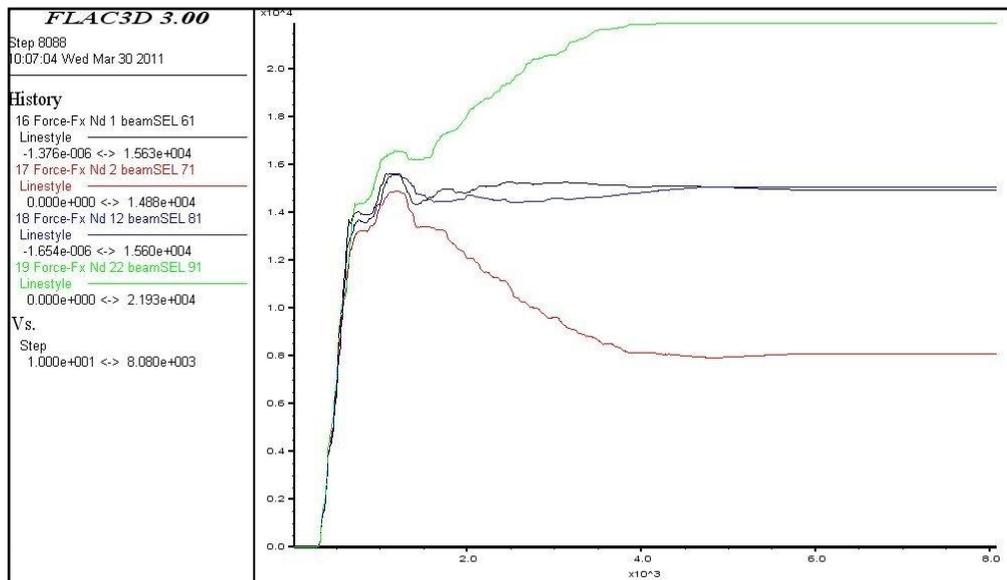


Figura 4.30.- Evolución del esfuerzo axial en los Pilares

Según todo esto, el siguiente paso consiste en la determinación del factor de seguridad. Los resultados numéricos obtenidos con FLAC 3D de esfuerzos, momentos y

factores de seguridad se exponen, dentro del ANEXO III, en el documento de “Valores Numéricos obtenidos con FLAC 3D”.

De acuerdo a los perfiles seleccionados, en general se obtienen factores elevados, siendo las barras más vulnerables las situadas en la Plataforma Interior, pero en cualquier caso con los factores de seguridad obtenidos en principio permiten garantizar la estabilidad de la estructura.

### 4.6.3 COMPROBACIÓN DE LOS FACTORES DE SEGURIDAD

Para garantizar que las tensiones no sobrepasen el límite de resistencia hay que considerar criterios de comprobación basados en las distribuciones elásticas de tensiones, de manera que en ningún punto de la sección las tensiones de cálculo, combinadas conforme al criterio de plastificación de Von Mises superen la resistencia de cálculo, es decir debe cumplirse, que:

$$\sigma_{\text{cálculo}} \leq \sigma_{\text{límite}}$$

siendo:

$$\sigma_{\text{límite}} = \frac{\sigma_e}{FS}$$

Donde  $\sigma_e$  corresponde al límite elástico del material y FS es el coeficiente de seguridad. Tomando como límite elástico 280 MPa que corresponde a un acero tipo S275 (según la norma UNE EN 10025) se procederá a calcular el factor de seguridad FS en cada punto, para lo cual es necesario determinar en primer lugar  $\sigma_{\text{cálculo}}$ . Esta  $\sigma_{\text{cálculo}}$  en un punto de la sección sometida a un estado plano de tensión viene dada por la expresión:

$$\sigma_{\text{cálculo}} = \sqrt{\sigma^2 + (3 \times \tau^2)}$$

siendo  $\sigma$  la tensión normal que es la componente perpendicular al plano y  $\tau$  la tensión cortante paralela al plano. Para comprender estas tensiones, si se considerara por ejemplo un cuerpo sometido a un sistema de fuerzas y momentos se observaría la acción de tensiones mecánicas en un plano imaginario que dividiese el cuerpo en dos partes; para que cada parte estuviera en equilibrio mecánico sobre la superficie de cada una de las partes debe actuar una fuerza elemental a partir de la cual se define un vector tensión

(T) como el resultado de dividir dicha fuerza elemental entre la superficie del elemento. Pues bien, este vector tensión T se puede descomponer en dos vectores que son  $\sigma$  y  $\tau$ , y que se denominan componentes intrínsecas del vector tensión. En la Figura 4.31 puede verse gráficamente cómo es la distribución de estas tensiones en un cuerpo sólido deformable.

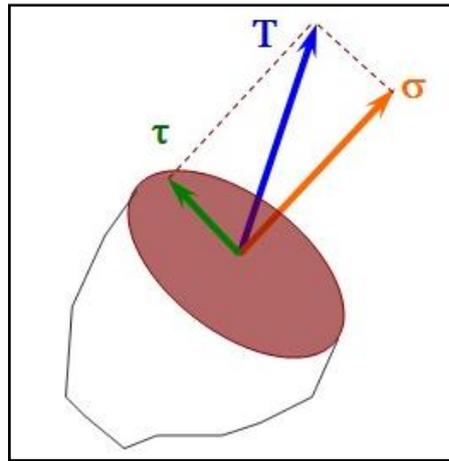


Figura 4.31.- Componentes intrínsecas ( $\sigma$  y  $\tau$ ) del vector tensión (T)

Las tensiones normales  $\sigma$  aparecen bien sea por aplicación de un esfuerzo axial, o bien por un momento flector. En el primer caso, donde el esfuerzo normal se distribuye uniformemente en la sección, entonces:

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

siendo N el esfuerzo axial y A el área de la sección.

Cuando lo que se tiene es una tensión normal debida a la presencia de un momento flector, entonces la expresión empleada es:

$$\sigma = \frac{M_i}{W_i}$$

siendo  $M_i$  el momento flector y  $W_i$  el módulo resistente de la sección.

Las tensiones cortantes  $\tau$ , por su parte, aparecen en caso de aplicación de un esfuerzo cortante o bien de un momento torsor. La primera viene dada por la expresión:

$$\tau = \frac{V_i \times m_i}{e_i \times I_i}$$

siendo  $V_i$  la fuerza cortante;  $m_i$  el momento estático de media sección;  $e_i$  el espesor del tramo considerado;  $I_i$  el momento de inercia.

En el caso de tensiones cortantes provocadas por un momento torsor, la expresión empleada, para perfiles abiertos ramificados, como es nuestro caso es:

$$\tau = \frac{3 \times M_T}{\sum_1^n s_i \times e_i^3} e_i$$

siendo  $M_T$  el momento torsor;  $s_i$  longitud del tramo considerado

Además hay que tener en cuenta que la distribución de tensiones es diferente a lo largo de las secciones consideradas. De este modo, los puntos más solicitados en un perfil metálico en doble T (HE o IP) se encuentran en las alas y alma de la sección correspondiente. La distribución de estas tensiones se muestra en la Figura 4.32.

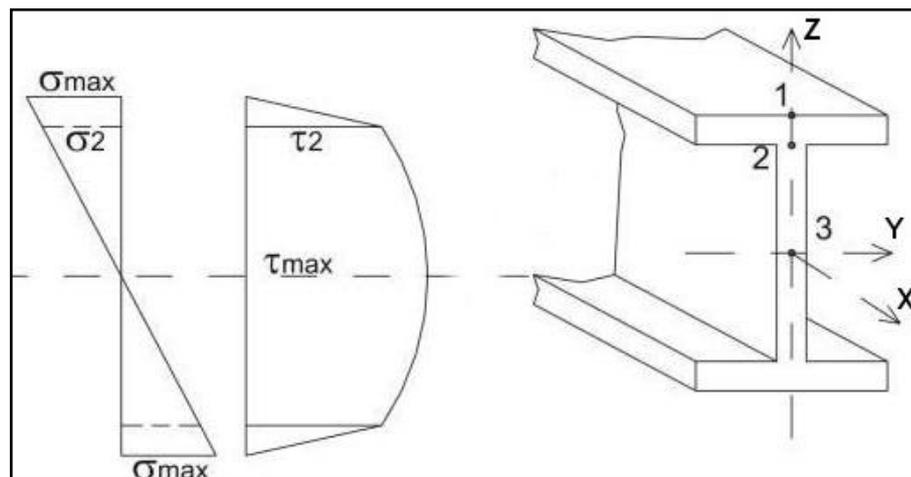


Figura 4.32.- Distribución de tensiones normales (izquierda) y tangenciales (derecha) en una sección doble T (HE o IP)

Adoptando el criterio de signos empleado en la simulación con FLAC 3D, en las alas la distribución de tensiones normales es máxima, y aparecen por aplicación de un esfuerzo axial  $N_x$  y la presencia combinada de dos momentos flectores  $M_y$  y  $M_z$ . Las tensiones tangenciales en el ala proceden de un momento torsor, y esto es así porque el máximo valor absoluto de la tensión tangencial en la sección del perfil se presenta en el tramo de espesor máximo, por lo que es esperable que cuando aumentamos el valor del momento torsor el perfil rompa por el tramo más grueso y no por el más delgado, como podría dictarnos la intuición, esto es, para los perfiles seleccionados, en el ala (puede

comprobarse tanto para los perfiles HEB-120 como UPN-120 que el espesor  $e_1$  del ala es mayor que el espesor  $e$  del alma), así pues:

$$\sigma_{\text{cálculo}} = \sqrt{\left(\frac{N_x}{A} + \frac{M_y}{W_y} + \frac{M_z}{W_z}\right)^2 + 3\left(\frac{3 \times M_x}{\sum_1^n s_i \times e_i^3} e_i\right)^2}$$

En el alma por su parte, además de la sollicitación por el esfuerzo axial, se tiene el máximo de las tensiones tangenciales debidas a esfuerzos cortantes, de modo que:

$$\sigma_{\text{cálculo}} = \sqrt{\left(\frac{N_x}{A}\right)^2 + 3\left(\frac{V_y \times m_z}{e_1 \times I_z} + \frac{V_z \times m_y}{e \times I_y}\right)^2}$$

donde:

$N_x$ : axial

$A$ : Área de la sección

$M_y$ : Momento flector en y

$W_y$ : Módulo resistente en y

$M_z$ : Momento flector en z

$W_z$ : Módulo resistente en z

$V_y$ : Cortante en y

$m_z$ : Momento estático de media sección

$e_1$ : Espesor del ala

$I_z$ : Momento de inercia en z

$M_x$ : Momento en x

$s_i$ : Longitud del alma y/o alas

$e_i^3$ : Espesor del alma y/o alas

$e_i$ : Espesor máximo (es el espesor del ala  $e_1$ )

$V_z$ : Cortante en z

$m_y$ : Momento estático de media sección

e: Espesor del alma

$I_y$ : Momento de inercia en x

Por tanto, partiendo de los valores del esfuerzo axil  $N_x$ , cortantes  $V_y$  y  $V_z$ , y momentos  $M_x$ ,  $M_y$  y  $M_z$  obtenidos mediante el programa informático FLAC 3D, junto con los valores de perfiles normalizados recogidos en la Tabla 4.13 se ha calculado el factor de seguridad, entendiéndose como tal, para cada nodo:

$$FS = \min(FS_{ala}, FS_{alma})$$

En el ANEXO III, dentro del documento “Cálculo de Factores de Seguridad”, se muestran los cálculos realizados para la determinación de los factores de seguridad basado en este procedimiento, y en “Comparativa entre Factores de Seguridad”, una comparativa entre éstos factores y los obtenidos mediante FLAC 3D.. En general se obtienen valores muy similares, pero fundamentalmente interesa que se trata de valores altos, únicamente en las barras interiores de la mesa superior es donde se aprecian valores más pequeños (entre 1,14 y 1,5), hecho evidente pues esta zona es la que soportará todo el grueso de la estructura. En cualquier caso dichos valores se encuentran por encima de 1, lo que garantiza la estabilidad de la estructura.

## 4.7 DISEÑO DE DETALLE

El diseño de detalle propuesto por Hurst pasa por el cálculo preciso de cada uno de los componentes. Sin embargo, en lo que al dispositivo ejemplo de aplicación se refiere, el nivel de detalle que se expondrá describe la apariencia del producto, definida por aspectos tales como la forma y la configuración.

Por ello, que se hará será una descripción de cada elemento que compone el dispositivo, acompañando la misma de un conjunto de dibujos para ayudar a comprender e ilustrar el equipo estudiado. Sin embargo el cálculo detallado de cada componente con vistas a su producción será objeto de futuros estudios.

### ➤ DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA DE ENSAYO

El diseño llevado a cabo permite desplazar el disco de modo lineal según tres

ejes X, Y, Z, y siguiendo un movimiento rotacional pivotando entorno al eje Z. El movimiento de los ejes de la máquina se ha basado en la designación básica de un sistema de coordenadas cartesianas, siendo los ejes X e Y el movimiento en horizontal, el eje Z el vertical y el movimiento de rotación  $\theta$  se produciría en torno a este eje Z, en el plano XY.

Los elementos fundamentales que constituirán la máquina son:

- Sistemas de transmisión y accionamiento mecánico lineal de tipo husillo y cilindro hidráulico.
- Sistemas de transmisión de movimiento rotacional de tipo engranajes.
- Sistemas de control de posición y velocidad mediante reguladores y codificadores.
- Cabezal provisto de la herramienta de corte.
- Estructura de sujeción de las diferentes piezas.

A efectos de la presente descripción, se aplica el concepto de "eje" a las direcciones de los diferentes desplazamientos de las partes móviles del dispositivo, siendo:

- Eje X es el eje en el que se realiza el movimiento longitudinal de la herramienta de corte (disco de corte).
- Eje Y es el eje en el que se realiza el movimiento transversal de la herramienta de corte.
- Eje Z es el eje en el que se realiza el movimiento perpendicular de la herramienta de corte hacia la muestra.
- El movimiento de rotación sobre el eje Z reproduce el giro de la herramienta de corte.

A partir de ahora se describirá la máquina en conjunto y sus diferentes elementos según el diseño que parece más adecuado con los objetivos propuestos.

### ❖ Mecanismo de Desplazamiento en el Eje X

Los componentes para permitir el desplazamiento a lo largo del eje X están situados en la Plataforma Exterior del armazón estructural.

De acuerdo a la selección previamente realizada, el sistema más óptimo de acuerdo a los criterios establecidos fue un sistema de desplazamiento lineal basado en husillos.

El término husillo define un tipo de tornillo, generalmente de gran longitud y de acero templado, empleado para producir el desplazamiento a lo largo de su eje en una estructura. En especial los husillos con tecnología de bolas permiten un avance sumamente eficiente, en el que la bola realiza un movimiento basculante entre el eje del husillo y la tuerca. Con un par de torsión inferior al de un husillo convencional, este sistema resulta muy adecuado para ahorrar energía de accionamiento. Por tanto los husillos de bolas constituyen mecanismos de transmisión de movimiento de rotación a lineal con gran precisión de posicionado y transporte de carga.

Lo husillos de bolas se componen básicamente de los siguientes elementos:

- El husillo, que es un eje cilíndrico, en cuya superficie exterior está labrada la pista de una rosca helicoidal con sección acanalada.
- La tuerca, que es un casquillo hueco, en cuya superficie interior está labrada la pista de una rosca helicoidal con sección acanalada, para constituir un montaje coaxial entre el husillo y la tuerca.
- Las bolas, cuerpos de rodadura y transmisión de fuerzas por presión sobre las mismas situadas en la pista labrada entre el husillo y la tuerca.
- Los deflectores, piezas para la recirculación de las bolas.

En la Figura 4.33 se pueden ver los componentes esenciales de un husillo de bolas.

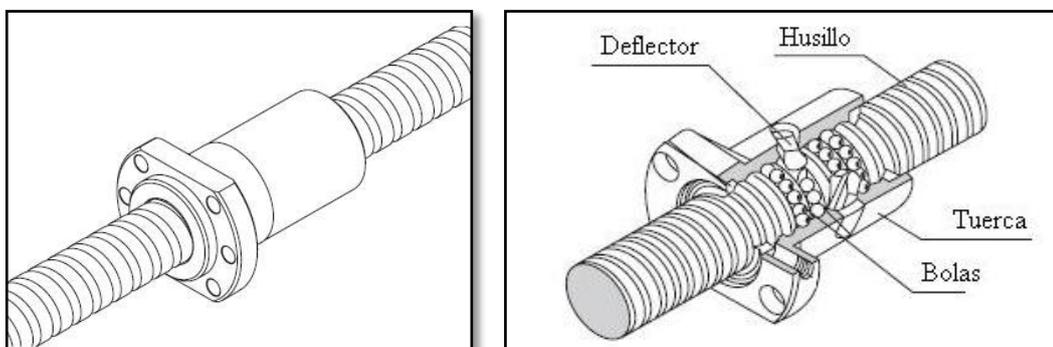


Figura 4.33.- Ejemplo de un husillo y la tuerca; y vista en sección de sus componentes (derecha)

Los husillos de bolas deben funcionar siempre lubricados, para mantener bajo el coeficiente de rozamiento y proteger contra la oxidación. El medio empleado puede ser aceite o grasa, aunque frecuentemente se emplea aceite. Con esta disposición de consigue un rozamiento casi nulo, rendimiento elevado y gran seguridad de funcionamiento. El husillo a su vez está fijado a la estructura de los perfiles de acero mediante dos unidades de soporte situadas en los extremos de cada husillo. Así se consigue una sujeción de los husillos de bolas a la máquina en un único conjunto.

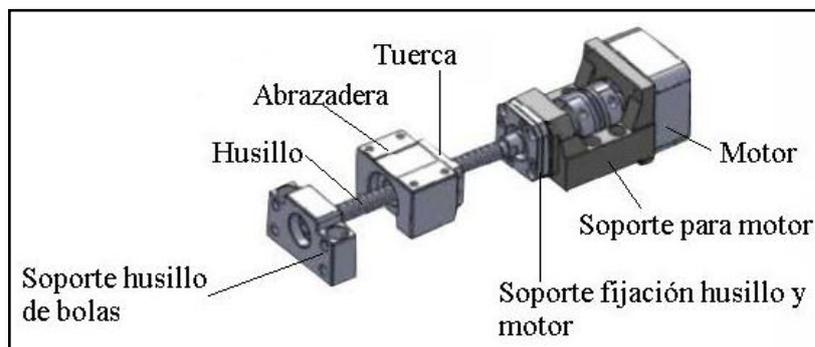


Figura 4.34.- Esquema típico para el desplazamiento en el eje X (incluyendo el motor)

Como se puede ver en la Figura 4.34, donde se muestra el esquema típico de los diferentes componentes para el movimiento según el eje X empleando husillos, las fuerzas para el desplazamiento deben ser proporcionadas por un motor eléctrico que hace girar el husillo de bolas y moverse sobre él a la correspondiente tuerca. En este sentido, los servomotores suelen ser los más empleados, con capacidad de ser controlados en velocidad y/o posición con precisión. Este servomotor tendrá asociado un *servodriver* que permite regular la velocidad de giro del eje. Además para completar todo este mecanismo electrónico existen codificadores rotatorios o *encoder* para convertir la posición angular de un eje a un código digital, es decir actúa como un transductor para detectar la posición del eje y poder llevar a cabo un control automático (cabe señalar que en el ANEXO IV, donde se muestran diferentes planos del equipo de ensayo, se ha prescindido de la representación de los motores a efectos de simplificación de la máquina diseñada). Finalmente el husillo va provisto de un componente que es la abrazadera de tuerca que a su vez enlaza con la Plataforma Interior para que conjuntamente, toda la estructura reproduzca el movimiento según el eje X. Así pues, en la Figura 4.35 se pueden ver los principales componentes mecánicos

que se han representado a modo general para el desplazamiento según el eje X, mientras que la Figura 4.36 refleja cuál es su situación en la estructura.

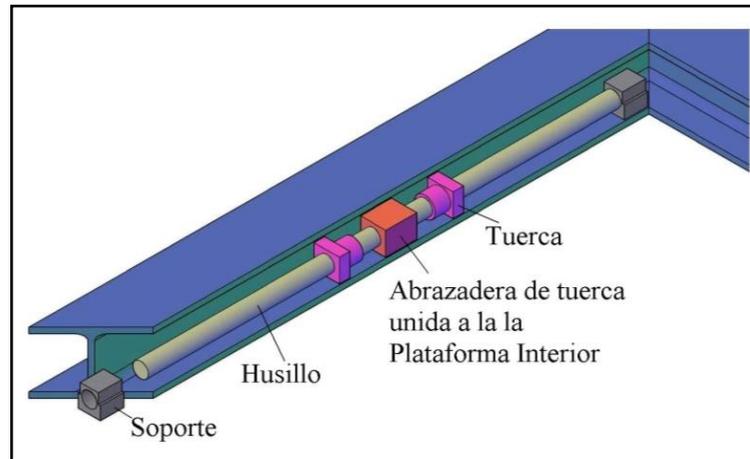


Figura 4.35.- Componentes principales para el desplazamiento en el eje X

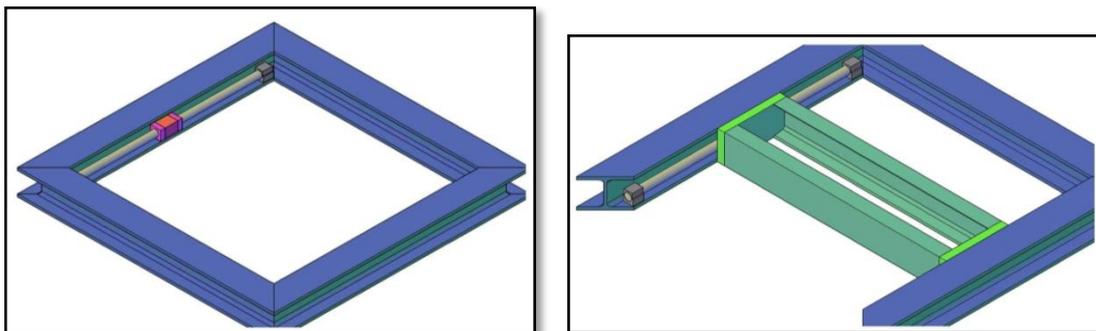


Figura 4.36.- Disposición del mecanismo de desplazamiento según el eje X en la estructura

### ❖ Mecanismo de Desplazamiento en el Eje Y

La configuración para el desplazamiento según el eje Y es similar al expuesto para el eje X, salvo que en este caso se realiza en la Plataforma Interior. De igual modo, para simular dicho desplazamiento existen dos husillos paralelos dispuestos en cada uno de los perfiles UPN-120 de la Plataforma Interior, y fijados a los mismos mediante unas unidades de soporte que aseguran el husillo. Se incluirá igualmente las tuercas asociadas a abrazaderas de tuerca desplazable según el eje Y que está unida a todo el mecanismo de accionamiento según el eje Z y el movimiento de rotación. Además, un servomotor para realizar el movimiento, un *servodriver* para regular la velocidad de giro del motor y codificador. En la Figura 4.37 se muestra dicho mecanismo de desplazamiento según Y, donde se puede ver su situación en Plataforma Interior.

Se puede comprobar por tanto que cada movimiento lineal va a ser controlado independientemente por un motor específico para cada eje, pero al mismo tiempo acoplados para funcionar como una máquina de trabajo conjuntamente, para lo cual será necesario disponer de una tarjeta electrónica que permita el control de los diferentes ejes.

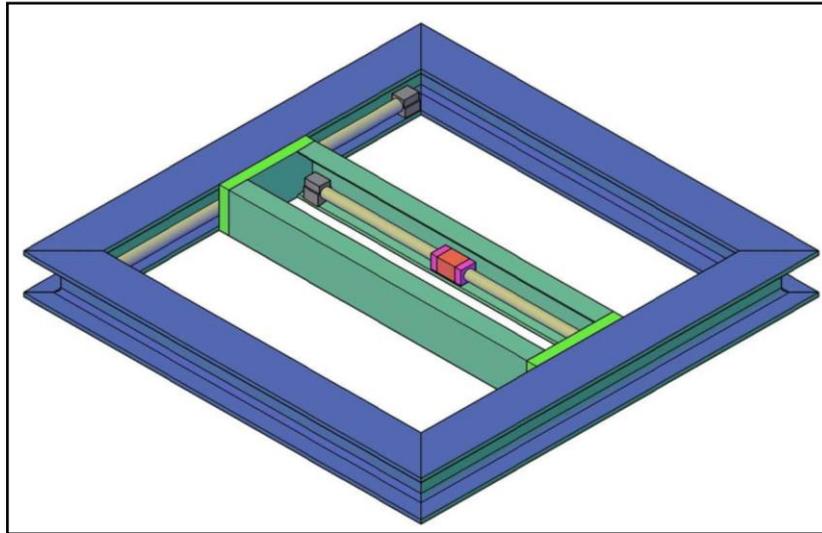


Figura 4.37.- Mecanismo para el desplazamiento según el eje Y

#### ❖ Mecanismo de Desplazamiento en el Eje Z

El mecanismo que permite el desplazamiento a lo largo del eje Z se encuentra situado en el interior de un armazón que se dispone entre los perfiles UPN-120 de la Plataforma Interior.

Este mecanismo se trata de un cilindro neumático/hidráulico, de acuerdo a la selección previamente realizada. Sin entrar a desarrollar exhaustivamente el mecanismo de funcionamiento de los cilindros, puede decirse a modo general que los cilindros hidráulicos se engloban dentro de lo que se conocen como actuadores hidráulicos, es decir, dispositivos capaces de transformar la energía hidráulica para la generación de un proceso automatizado. El cilindro hidráulico consta básicamente de dos piezas:

- por una parte un eje a lo largo del cual se extiende el vástago y que está dotado de un ensanchamiento que configura el pistón móvil,
- y por otra parte la propia carcasa del cilindro con las correspondientes tomas de entrada y salida del líquido hidráulico.

La carcasa tiene una perforación por donde sale el vástago, una vez que la presión hidráulica actúa sobre el pistón. En el extremo del vástago se acoplará al elemento a accionar de la máquina, tal como se expondrá más adelante. En la Figura 4.38 se puede ver la disposición de los componentes esenciales de un cilindro hidráulico típico.

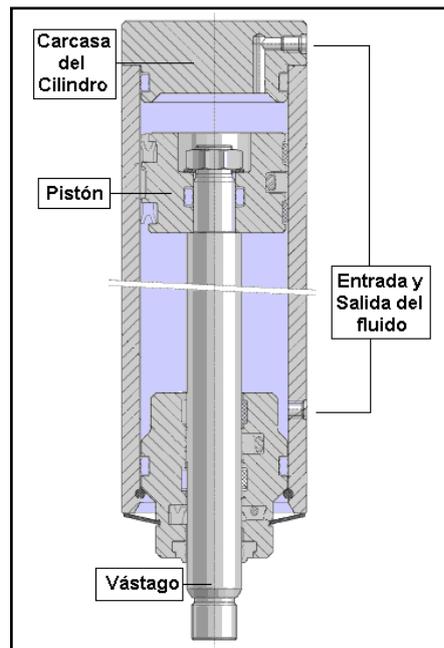


Figura 4.38.- Configuración típica de un cilindro hidráulico

El cilindro situado en la Plataforma Interior, debe ser capaz de proporcionar la potencia necesaria para que el disco de corte pueda penetrar en la roca. Por ello es preferible unos medios neumáticos o hidráulicos para la penetración del disco en la roca, pues permiten obtener grandes potencias y poder de penetración. El cilindro hidráulico, además de una carcasa con la correspondiente toma de entrada y salida del líquido hidráulico, estará dotado de un eje a lo largo del cual se extienda un vástago cuando la presión hidráulica actúe sobre el pistón. Con este mecanismo se realizará el desplazamiento según el eje vertical Z. Como ya se mencionó, a su vez, el armazón se dispondrá unido a las abrazaderas de tuerca del eje Y para poder desplazarse según el mismo. En la Figura 4.39 se puede ver la disposición de dicho cilindro en la Plataforma Interior.

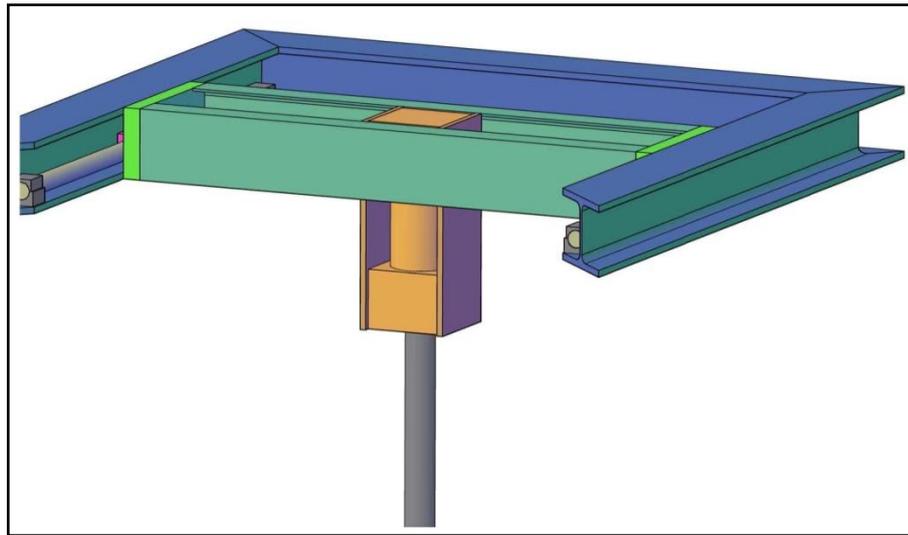


Figura 4.39.- Cilindro hidráulico para el desplazamiento según el eje Z

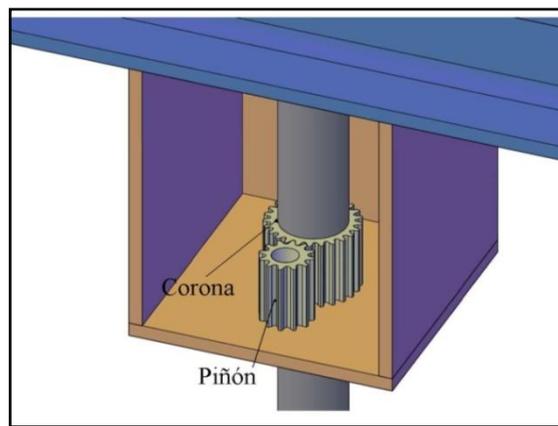
#### ❖ Mecanismo de Rotación

El mecanismo para lograr la rotación de la herramienta se basa en un sistema de engranajes localizado justo debajo del cilindro hidráulico, es decir, a lo largo del eje Z. Como se ha venido señalando uno de los objetivos principales planteados, es el diseño de un equipo que permita realizar ensayos siguiendo una trayectoria curva el útil de corte, es decir, reproduciendo la geometría real que trazan los discos en las tuneladoras al excavar un frente rocoso. Para ello es necesario conseguir el giro de la herramienta un ángulo  $\theta$  en torno al eje vertical Z, de modo que tendrá que existir una transmisión mecánica entre diferentes elementos que comunique el movimiento circular de un órgano a otro.

El sistema seleccionado para reproducir este movimiento fue un sistema de engranajes, al constituir uno de los mejores medios disponibles para transmitir dicho movimiento cuando en las máquinas la transmisión de potencia se hace de un eje a otro paralelo cercano a él.

El sistema de engranajes en este caso estará formado por dos ruedas dentadas: engranaje conducido y engranaje conductor, en las cuales se transmite el movimiento desde el eje motriz a través del engranaje conductor hasta el vástago del cilindro que, concéntrica y solidariamente, incorpora el engranaje conducido. Según el número de dientes y tamaño de los engranajes se puede conseguir un mecanismo de aumento o

reducción de la velocidad desde el motor que suministra la fuente de energía. Aquí se pretende que el giro que se transmita al final al disco sea pequeño, por lo que interesa tener un sistema reductor de velocidad, es decir, que el eje de salida gire más despacio que el eje de entrada, para lo cual el engranaje conducido deberá ser de mayor tamaño que el engranaje conductor. Al engranaje de mayor tamaño se le llama corona y al de menor tamaño piñón como se ve en la Figura 4.40



**Figura 4.40.-Mecanismo de transmisión mediante engranajes**

El engranaje de mayor tamaño es el engranaje conducido o corona, y el de menor tamaño el engranaje conductor o piñón. Con esta disposición, al transmitirse el giro del engranaje conductor al engranaje conducido se simula el empuje, la traslación y el giro tal como sucede en los discos de corte situados en la cabeza de corte de las máquinas tuneladoras.

Este mecanismo a su vez, se encuentra alojado en el interior de un armazón que va acoplado, a su vez, al armazón que contiene el cilindro hidráulico, como se aprecia en la Figura 4.41.

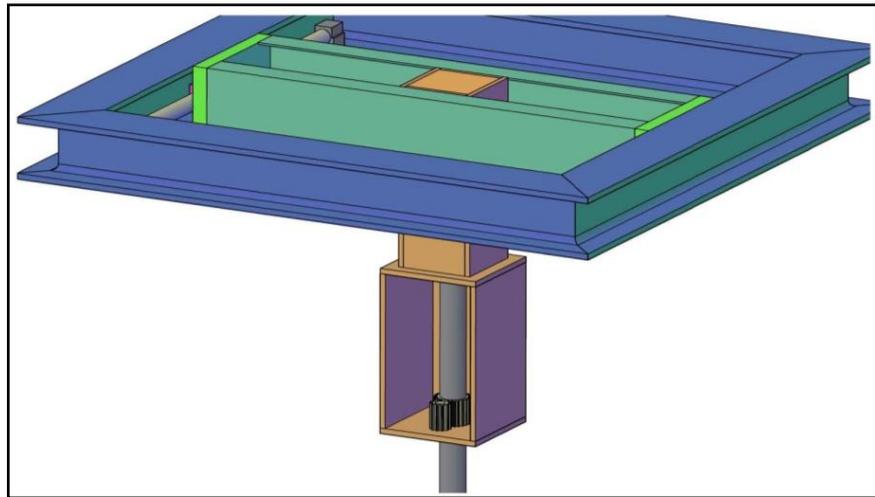


Figura 4.41.- Disposición del mecanismo de rotación en la estructura

### ❖ Útil de corte

Como ya se explicó previamente, los denominados comúnmente discos, son las herramientas de corte que emplean las tuneladoras para excavar un frente rocoso.

A modo general, y como se puede ver en la Figura 4.42, en un disco de corte los componentes fundamentales que se pueden diferenciar son:

- Un eje de rotación fijado a un cabezal.
- Un anillo central que constituye el elemento de corte al ser la parte que está en contacto directo con la roca, que gira alrededor del eje (este anillo será la parte más susceptible al desgaste).
- Anillos de fijación para, como su propio nombre indica, fijar el anillo de corte.
- Accesorios extremos para el elemento de corte.

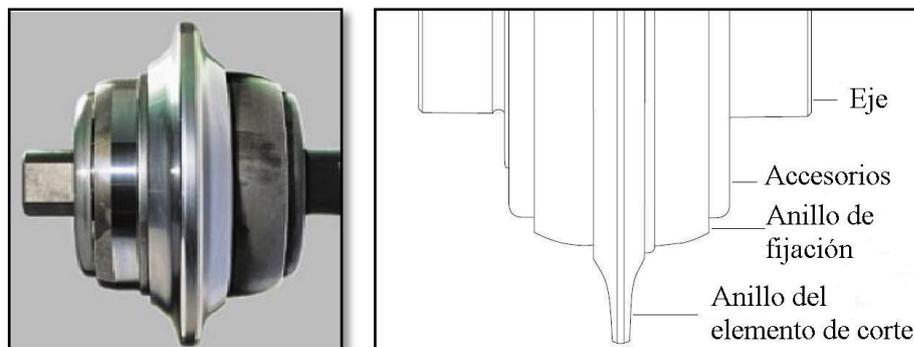
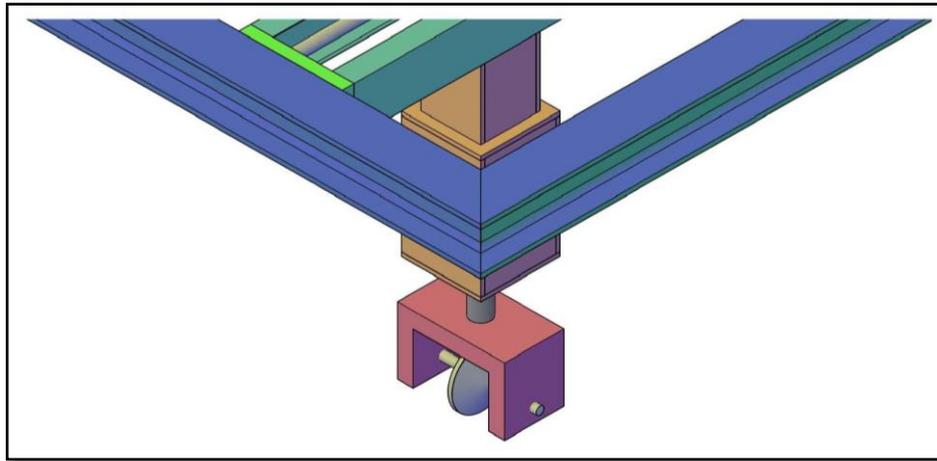


Figura 4.42.- Fotografía de un disco de corte y esquema de componentes esenciales (derecha)

Así pues, la herramienta de corte empleada consistirá en un disco de corte igual a los que utilizan las máquinas tuneladoras. Se dispondrá alojado en el interior de un cabezal a través de un eje. El cabezal estará unido solidariamente al vástago para simular el movimiento rotacional sobre el eje Z.



**Figura 4.43.- Disposición del disco en la estructura**

Para completar la descripción del dispositivo, cabe destacar que para que todo el equipo pueda trabajar de manera automática se hace necesaria la utilización de unos medios motores que comprenda:

- Unos motores eléctricos con un regulador de velocidad y un codificador angular, asociados a cada movimiento del cabezal, lineal respecto a los ejes X, Y o angular respecto al eje Z.
- Un control eléctrico o electrónico de velocidad y de posición angular y/o de presión. Cada movimiento lineal es controlado independientemente por un motor o bomba específico para cada eje pero, al mismo tiempo, están acoplados para funcionar como una máquina de trabajo conjuntamente. Para ello es necesario disponer de un control numérico según los diferentes ejes. Los motores tienen asociado un regulador de velocidad de giro del eje. Además, para completar todo este mecanismo electrónico existen codificadores rotatorios que convierten la posición angular de un eje a un código digital. Actúan como transductores que detectan la posición del eje para poder llevar a cabo el control del mismo de manera automática.

- 
- Por otra parte se recomienda la utilización de un sistema de captación automática de datos que incorpore una célula de carga y un sensor de desplazamiento sobre cada uno de los ejes. Las señales proporcionadas se pueden grabar en un sistema de captación y almacenamiento de datos, materializado en dos tarjetas de adquisición de datos de forma continua. Para el sistema de tratamiento de datos se utilizará un ordenador personal en el que funcione una aplicación informática propia, desarrollada por el Grupo de Investigación de Ingeniería del Terreno de la Universidad de Oviedo, al que pertenece la autora del presente Trabajo Fin de Máster.

---

## 5 RESULTADOS

El presente Trabajo Fin de Máster es un trabajo de recopilación de conceptos y herramientas consideradas como fundamentales para el diseño en ingeniería, y aplicado a un dispositivo para ensayo en roca, siguiendo los criterios que Ken Hurst plantea en “*Engineering Design Principles*”. Siguiendo la metodología y aplicando las técnicas recomendadas, se ha llegado a diseñar una máquina para la realización de ensayos en laboratorio, empleando los discos de corte que utilizan las máquinas TBM, cuyo objetivo es analizar los parámetros involucrados en el proceso de excavación.

A través de la aplicación de la metodología propuesta por Hurst, se llevó a cabo en primer lugar una recopilación bibliográfica de los diferentes estudios realizados en lo que se refiere al arranque de roca mediante discos, con el fin de obtener una primera aproximación del estado del arte, para lo cual se acudió a revistas científicas especializadas y diferentes bases de datos disponibles. La recolección de artículos y patentes mediante los diferentes buscadores recomendados permitió identificar aspectos fundamentales que condicionaron el desarrollo posterior del dispositivo, como es el hecho de la inexistencia de ensayos simulando la acción combinada de rotación y empuje de manera similar a como operan las máquinas TBM. Sin embargo, hay que ser conscientes que mucha de la información que se obtuvo en esta fase no se puede obtener fácilmente a través de los métodos de búsqueda tradicionales, siendo necesario diferentes tipos de suscripciones a revistas científicas (o bien a través de las Bibliotecas de la mayoría de Universidades) para poder acceder a ellas.

A continuación, se procedió a la definición inicial del producto a través de la redacción de las especificaciones, constituyendo la guía y referencia para su diseño y desarrollo. Establecer la definición del producto es una etapa fundamental para su correcto desarrollo posterior. Las deficiencias en la definición del producto llevan a menudo a desenfocar su resolución, dedicando muchos esfuerzos a aspectos poco relevantes, o desatendiendo aspectos fundamentales. Pero también hay que tener en cuenta que si la especificación es demasiado ambiciosa puede repercutir en que se incremente el coste del producto así como un aumento de la dificultad de fabricación. Por ello hay que reconsiderar la especificación cuando sea razonable, estableciendo un

---

proceso de iteración entre la definición del producto y su diseño conceptual.

Posteriormente se llevó a cabo la etapa de generación de ideas o conceptos en el dispositivo, para lo cual se combinó la técnica del análisis morfológico y del *brainstorming*, y así potenciar la generación de conceptos de cara a su desarrollo posterior. En muchas ocasiones se considera que la creatividad es una cualidad innata de ciertas personas que está asociado con la propia personalidad. Sin embargo, la existencia de técnicas de fomento de la capacidad creativa y generación de ideas permite superar esta incapacidad y desarrollar el potencial creativo. El problema que puede subyacer de la utilización de estas técnicas es precisamente que no se utilicen de manera apropiada, y no se sigan las recomendaciones que aquí se han propuesto, como el claro ejemplo del *brainstorming*, donde la norma básica de evitar el criticismo se omite con frecuencia, haciendo poco efectivo el proceso en sí. De ahí que sea fundamental seguir las técnicas de manera adecuada para conseguir su efectividad.

Con las especificaciones definidas, y generados los conceptos para el diseño del dispositivo de ensayos con discos de corte, a continuación se pasaron a seleccionar los conceptos planteados, a través de la realización de matrices de decisión para la clasificación y ponderación de diferentes criterios de selección, una vez consideradas las diversas alternativas surgidas en la etapa anterior de generación de ideas. Esta fase de selección es crítica, pues una elección inadecuada raramente puede ser compensada en posteriores fases sin que ello suponga un incremento considerable de rediseño. Para evitar esto en la medida de lo posible existen diversas técnicas que se han propuesto para evaluar y seleccionar conceptos relativos al producto con el objetivo de reforzar y reducir el riesgo de fracaso del proceso. En ocasiones, profesionales con amplia experiencia en el sector del diseño, en lugar de sopesar todos los factores, seleccionan los conceptos por intuición, sin recurrir a un procedimiento formal. Esta tendencia es un error, incluso cuando se trata de problemas relativamente sencillos. Así, la adopción de un proceso sistemático de toma de decisiones es esencial tanto para personal con poca experiencia, como profesionales en dicha temática. Sin embargo, es cierto que en la aplicación de estas técnicas prevalece un cierto componente de subjetividad, siendo recomendable que sea abordado por más de un profesional con el fin de corroborar los conceptos seleccionados.

A continuación, se procedió al desarrollo, realizando unos bocetos, a mano alzada, de las distintas posibilidades, fundamentalmente, en cuanto a la forma y el modo de disposición en la máquina, y así encauzar el diseño estético del dispositivo objeto de estudio.

Basándose en ello, se realizó, en primer lugar, una simulación, empleando el programa FLAC 3D, para realizar una modelización de la estructura, calculando los esfuerzos y momentos a los que estará sometida la estructura como consecuencia de la aplicación de las cargas, así como una aproximación de los factores de seguridad que garanticen la estabilidad de la misma. Además los valores obtenidos con FLAC se han utilizado para hacer una segunda comprobación del factor de seguridad mediante un cálculo clásico. Con ello se ha podido dimensionar adecuadamente la estructura que engloba a la máquina y garantizar la estabilidad de la misma. La ventaja fundamental de la utilización de estos modelos es que, en la mayoría de las ocasiones, el modelo se realiza mediante representaciones asistidas por ordenador y modelos matemáticos que permiten realizar análisis de esfuerzos, deformaciones y fatiga, ahorrando tiempo y dinero representado en materiales y costes de fabricación. Lo ideal en un proceso de diseño es la construcción de un prototipo para la realización de pruebas, con el fin de validar los modelos de cálculo, comprobar la resistencia y durabilidad de la máquina y detectar y corregir defectos. Sin embargo, hay que ser conscientes que la realización de estos prototipos a tamaño completo puede implicar el retraso del lanzamiento del producto si no se ha planificado adecuadamente, y hay muchos casos en los que la fabricación de modelos a escala real durante el diseño es prácticamente imposible.

Finalmente, en la etapa de diseño detallado planteado, se ha descrito cada uno de los componentes empleados para permitir el desplazamiento en cada uno de los ejes proyectado, esto es, según el eje X de desplazamiento lateral, eje Y de desplazamiento transversal y eje Z el vertical, además del giro del disco para simular más fielmente la trayectoria real de los mismos durante la ejecución de una obra subterránea.

El resultado de todo ello ha permitido que, tras la presentación de la solicitud de patente de dicho dispositivo, fueses concedida por la OEPM (Oficina Española de Patentes y Marcas) a fecha de Enero de 2013, bajo el número de publicación ES 2387277, una vez realizado el proceso de evaluación necesario que garantizase que la

invención cumple con los requerimientos de novedad, actividad inventiva, aplicabilidad y descripción suficientes. En el ANEXO V se puede ver dicha Patente de Invención.

En esta patente están expuestos todos los aspectos referidos al dispositivo de ensayo que se han ido desarrollando, de manera mucho más detallada, a lo largo del presente Trabajo. Además se incluye una metodología de ensayo a seguir empleando la máquina de corte. Es necesario destacar que aunque el nivel de detalle no permite aún la producción de la máquina, pues son necesario cálculos más precisos, sí que ha sido suficiente para poder ser aprobado el dispositivo como Patente de Invención, con titularidad perteneciente a la Universidad de Oviedo.

Por tanto, si bien es cierto que existen diferentes metodologías para el desarrollo de productos, este Trabajo se ha centrado exclusivamente en el desarrollo y exposición de la metodología propuesta por Hurst, donde destaca su concreción y sobre todo practicidad a través de múltiples técnicas y ejemplos de aplicación en el planteamiento de cómo debe desarrollarse un diseño de un producto. Así pues, la metodología que propone se fundamenta en el desarrollo de una serie de etapas, cuya ejecución se realiza gracias a la utilización de multitud de técnicas según la fase de desarrollo del proyecto.

Establecer una metodología tiene la gran ventaja de que permite alcanzar los objetivos propuestos de manera ordenada y organizada, ayuda a determinar la secuencia de acciones, el contenido de las mismas y los procedimientos específicos mediante el empleo de técnicas y herramientas. En cualquier caso siempre se debe ser consciente que la aplicación de un método facilita, pero no garantiza, la obtención de resultados. Es más, aunque se propone la realización de una serie de etapas con un orden lógico, ello no debe confundirse con una progresión lineal de las tareas. De hecho, la mayor parte del proceso de diseño es iterativo, debiendo partir de suposiciones a probar, comparar, corregir y de nuevo probar a través de todo un ciclo de operaciones hasta satisfacer los requerimientos del problema.

Además cabe señalar que se pretende que el trabajo pueda ser utilizado de guía con un carácter en cierto modo generalista, de tal modo que aunque aquí se han aplicado unas herramientas concretas, es evidente que en cada proyecto, por definición único, se deberán adaptar y seleccionar, de acuerdo al tipo de diseño, las técnicas que puedan ser

consideradas más adecuadas para los objetivos propuestos de cada diseño.

En cualquier caso, es indudable que el establecimiento de una metodología, así como la aplicación de diversas técnicas, facilita el proceso de diseño gracias a la identificación clara de la problemática a desarrollar.

---

## 6 CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Máster, tomando como referencia los principios y etapas para llevar a cabo un buen diseño en ingeniería, descritos por Ken Hurst en su obra “*Engineering Design Principles*”, se ha expuesto una metodología y descripción de diversas técnicas comúnmente empleadas durante el proceso de diseño de nuevos productos.

Para ilustrar el método descrito, se propuso la aplicación del procedimiento planteado al diseño de un dispositivo que consiste en una máquina para la realización de ensayos en roca empleando discos de corte similares a los que emplean máquina tuneladoras (TBM) cuando excavan el macizo rocoso. El objetivo que se pretende con la realización de los ensayos de laboratorio, es que la información extraída de los mismos sea de gran utilidad a la hora de optimizar el diseño de las máquinas tuneladoras.

La investigación desarrollada ha permitido desarrollar un dispositivo a través de todo un procedimiento constituido por una serie de fases, que abarca desde la búsqueda inicial de información para determinación del estado del arte, hasta el diseño de detalle. Con ello se consiguió que el dispositivo haya sido aprobado por el Organismo Público responsable del registro y la concesión de las distintas modalidades de Propiedad Industrial, la OEPM, como Patente de Invención, bajo el número de publicación ES 2387277.

A través del establecimiento y aplicación de una metodología de diseño se ha comprobado que tiene la gran ventaja de permitir alcanzar los objetivos propuestos de manera ordenada y organizada, ayudando a determinar la secuencia de acciones, el contenido de las mismas y los procedimientos específicos mediante el empleo de técnicas y herramientas.

Este trabajo pretende ser un manual de consulta y herramienta de apoyo a emplear, tanto por el alumnado como por profesionales cuando pretendan abordar la temática aquí desarrollada.

---

## 7 LÍNEAS FUTURAS

Se propone una línea de futuro basada en la continuación de la metodología propuesta de cara a la fabricación del producto. Para ello, la siguiente etapa del proceso de diseño debería ser la realización de un prototipo a escala a real, como se postula en la metodología de diseño propuesta por Ken Hurst, para lo cual se hace necesario un diseño completo con el cálculo preciso de cada componente que conforma el dispositivo.

Será necesario definir cada elemento de manera detallada, aportando las especificaciones técnicas para su producción, definición de materiales y procesos de manufactura, así como las técnicas de ensamblado y montaje para la fabricación para cada una de las partes y subconjuntos del dispositivo. Para ello será necesario la utilización de herramientas de modelado en 3D similares a las ya propuestas, pero llevando a cabo un completo despiece del conjunto, siendo fundamental elaborar de manera detallada los costes e inversiones así como recursos necesarios para acometer la fabricación del producto.

Posteriormente se deberá realizar una verificación y testeo para confirmar que todo el diseño de detalle del producto cumpla con las características conceptuales del producto, a través de la comprobación de las especificaciones establecidas en las fases anteriores facilitando su paso a producción. Con ello se pretenderá validar la propuesta en condiciones de uso realista, ajustando una solución fabricable con la definitiva selección de proveedores. El resultado de esta fase debería ser ya planos de fabricación y documentación asociada de todos los pasos y razones de toma de decisión.

Con todo lo anterior realizado, se debería estar en disposición de pasar a la fase de producción, para lo cual es recomendable la realización de una prueba piloto para validación de los componentes. La fluidez con la que transcurra el desarrollo de las actividades de esta fase, reflejará de algún modo las bondades del diseño trabajadas previamente.

Tras esta fase, será conveniente verificar regularmente el producto, así como la realización de calibraciones para que finalmente, permita estudiar las líneas de

---

investigación planteadas y extraer resultados concluyentes.

Por otra parte, en lo que a propuestas futuras de investigación se refiere, relacionado con el tipo de estudios a llevar a cabo con el dispositivo, se ha sugerido abordar el problema del estudio del mecanismo de rotura frente a la acción de discos de corte no sólo en laboratorio, sino también *in situ*. Por ello, una futura línea de investigación consistirá en plantear una serie de modificaciones en el dispositivo de cara a su utilización en campo. Dichas modificaciones pasarían por un rediseño del armazón estructural que engloba la máquina, eliminando la Base Exterior, Base Interior y Pilares para fijación de la Plataforma Exterior al macizo rocoso. Esta fijación podría consistir en la colocación de tres elementos de fijación en cada uno de los cuatro extremos de la plataforma exterior de manera que se consiga anclar el dispositivo al macizo rocoso y así trabajar directamente *in situ* tal como excava una máquina TBM.

Para todo ello sería necesario repetir el procedimiento de diseño, siguiendo la metodología que aquí se ha propuesto de acuerdo a las nuevas especificaciones que se postulen.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

1. Argüelles Álvarez, R.; Argüelles Bustillo, R., Arriaga Martitegui, F.; Atianza Reales, J.R. (1999). *Estructuras de acero*. Cálculo: Norma básica y Eurocódigo.
2. Balcells, J., Romeral J.L. (1997). *Autómatas programables*. ISBN: 84-267-1089-1. Barcelona.
3. Balci, C.; Tumac, D. (2012) *Investigation into the effects of different rock on cuttability by a V-type disc cutter*. Istanbul Technical University, Department of Mining Engineering, Turkey.
4. Barton, N. (1999) *TBM performance estimation in rock using QTBM*. Tunnels and Tunnelling International, pp. 30-34].
5. Bienawski, Z. T.; Tamames, B. C.; Fernández, J. M. G.; Hemández, M. A. *Rock Mass Excavability (RME) (2006) Indicator: new way to selecting the optimum tunnel construction method*. In: ITA-AITES World Tunnel Congress & 32nd ITA General Assembly, Seoul.
6. Blindheim, O. T. (2005) *A critique of QTBM*. Tunnels & Tunnelling Int.
7. Castaño, A., Moreno, H. (2004) *Libro de Diseño de Máquinas*. Medellín.
8. Catálogo técnico KORTA. Husillos a bolas.
9. Cho, J.; Jeon, S.; Jeong, H.; Chang, S. (2013) *Evaluation of cutting efficiency during TBM disc cutter excavation within a Korean granitic rock using linear cutting machine testing and photogrammetric measurement*. Construction Equipment and Parts R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Korea.
10. Diessler, G.(2010) *Las patentes como fuente de información para la innovación en entornos competitivos*. Inf. cult. soc. [online], n.22, pp. 43-77. ISSN 1851-1740.
11. Farmer, I. W.; Glossop, N. H. (1980) *Mechanics of disc cutter penetration*. Tunnels Tunnell, 12 (6): 22-25.
12. Fernández, J., López, V., Sánchez, R., Antuña, R., *Guía metodológica de diseño*

para fabricación y ensamblaje. Fundación Prodintec.

13. Figueroa R, Valdivia F, Contreras P, Zúñiga F. (2009) *Fuentes de Información*. Instituto de Geografía.
14. FLAC 3D, versión 3.00. User's Guide. Itasca Consulting Group. Minneapolis, Minnesota. USA.
15. García Melón, M.; Cloquell Ballester, V.; Gómez Navarro, T. (2001) *Metodología del diseño industrial*. Universidad Politécnica de Valencia.
16. Graham, P. C. (1976) *Rock exploration for machine manufactures*. Symposium on Exploration for Rock Engineering Johannesburg, Balkema. 1: 80- 173.
17. Hernandis, B., Cabello, M. (2006). *Creatividad, Innovación y Desarrollo de nuevos productos*.
18. Hurst, K. (1999). *Engineering Design Principles*. University of Hull.
19. Jalali, S. H.; Naghadehi, M. (2013) *Development of a new laboratory apparatus for the examination of the rotary – percussive penetration in tunnel boring machines*. Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran.
20. López García L.; López Perales, J.A. *Elementos de Construcción*. Uniones por soldadura. Universidad de Castilla - La Mancha.
21. Manual de la Creatividad empresarial. Crea Business Idea.
22. Marchena, W., Ornelas, C. (2007). *Optimización y la programación lineal: una introducción*.
23. Muro, T.; Tschiya, K.; Kohno, K. (2002) *Experimental considerations for steady state edge excavation under a constant cutting depth for a mortar specimen using a disk cutter bit*. Journal of Terramechanics. Faculty of Engineering, Ehime University, Matsuyama, Ehime, 790-8577, Japan.
24. Naverstad, S. (2003). *Elemento de corte para máquinas perforadoras de túneles*. Número de patente: ES 1 054 145 U.
25. Ortiz Berrocal, L. (1990). *Resistencia de materiales*.

- 
26. Ozdemir, L.; Friant, J. (1999) *Shielded cutterhead with small rolling disc cutters*. Excavation Engineering Associates, Inc., Seattle, Wash. Patent Number 5, 961, 185.
27. Ozdemir, L.; Miller, R.; Wang, F. D. (1978) *Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machine Design*. Final Project Report to NSF APR73-07776-A03, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
28. Palmstrom, A.; Broch, E. (2006) *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system*. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
29. Pardo, A. Lasuen, A. *Técnicas de creatividad para resolución de problemas*. Atención Integral al Desarrollo de la Persona. Sorkari.
30. Pérez, J., Benedito, J., Poveda, S. *Expresión Gráfica en la Ingeniería*. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica.
31. Rostami, J. (1997) *Development of a force estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*. Ph. D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden Colorado, USA, p. 249.
32. Rostami, J. (2013) *Study of pressure distribution within the crushed zone in the contact area between rock and disc cutters*. Department of Energy and Mineral Engineering, Pennsylvania State University, USA.
33. Rostami, J.; Ozdemir, L. (1993) *A new model for performance prediction of hard rock TBM*. In: Bowerman, L. D., et al. (Eds.), *Proceedings, Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, pp. 793-809.
34. Roxborough, F. (1975) *Research in Mechanical Rock Excavation: Progress and Prospects*. In. *Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference*, 1, 225-244. New York, USA.
35. Sancibrián, R. (2010). *Introducción a los engranajes*. Cinemática y dinámica de máquinas. Departamento de Ingeniería estructural y mecánica. Universidad de Cantabria.

- 
36. Sanio, H. P. (1985) *Prediction of the performance of disc cutters in anisotropy rocks*. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 22/3, 153- 161.
37. Sapigni, M.; Berti, M.; Bethaz, E.; Busillo, A.; Cardone, G. (2002) *TBM performance estimation using rock mass classifications*. Dipartimento di Scienzedella Terra e Geologico-Ambientali, Universita di Bologna, Italy.
38. Sarrio, H. P. (1985) *Prediction of the performance of disc cutters in anisotropy rocks*. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 22/3, 153- 161.
39. Sato, K.; Gong, F.; Itakura, K. (1991) *Prediction of disc cutter performance using a circular rock cutting ring*. In: Proceedings, The first International Mine Mechanization and Automation Symposium, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA.
40. Snowdon, A. R.; Ryley, D. M.; Temporal, J. (1983) *Study of Disc cutting in select British Rocks*. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 19, 107-121.
41. Villamil García, E.; García Hernández, M. (2003) *Introducción al Proyecto de Ingeniería*. Universidad Politécnica de Cataluña.
42. Wang, L.; Kang, Y.; Cai, Z.; Zhang, Q.; Zhao, Y.; Zhao, H.; Su, P. (2012) *The energy method to predict disc cutter wear extent for hard rock TBMs*. Department of Mechanic, School of Mechanical Engineering, China.

Enlaces:

<http://www.boschrexroth.com/en/xc/>

<http://www.igus.es/default.asp>

<http://www.skf.com/group/splash/index.html>

<http://www.thk.com/?q=es>

<http://www.thomsonlinear.com/website/com/eng/index.php>

# **ANEXOS**

# Índice

---

## **ANEXOS**

- **ANEXO I: LISTADO DE BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN**
- **ANEXO II: BOCETOS INICIALES DE DESARROLLO DEL DISPOSITIVO**
- **ANEXO III: RESULTADOS NUMÉRICOS DE MODELIZACIÓN**
  - VALORES NUMÉRICOS OBTENIDOS CON FLAC 3D**
  - CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD**
  - COMPARATIVA ENTRE FACTORES DE SEGURIDAD**
- **ANEXO IV: PLANOS DEL EQUIPO DE ENSAYO**
  - VISTA GENERAL DEL EQUIPO DE ENSAYO**
  - VISTA EN PLANTA**
  - VISTA DE ALZADO**
  - VISTA DE PERFIL**
  - VISTA EN 3D**
- **ANEXO V: PATENTE DE INVENCIÓN DEL DISPOSITIVO**

# **ANEXO I:**

# **LISTADO DE BÚSQUEDA DE**

# **INFORMACIÓN**

A continuación se detallan una serie de enlaces que permiten la búsqueda de información para elaborar el Estado del Arte y acceder a material científico de manera más minuciosa.

Cabe mencionar que algunos de ellos se trata de enlaces que la mayoría de las Universidades españolas ponen a disposición del personal investigador a través de sus Bibliotecas, tratándose de fuentes de información que en algunos casos, no están disponibles a través de los motores de búsqueda tradicionales, debiendo estar la entidad o empresa suscrita a una base de datos concreta para poder acceder a la información que aquí se detalla.

### ➤ *PROPIEDAD INDUSTRIAL: PATENTES Y MODELOS DE UTILIDAD*

**Latipat-Espacenet:** <http://es.espacenet.com/>

Base de datos que contiene más de un millón de datos bibliográficos y varios miles de imágenes contenida en los documentos de patentes publicados por la MPI, la EPO, la OEPM y numerosas oficinas nacionales de países latinoamericanos. Aunque pueda parecer que contienen sólo patentes españolas y latinoamericanas, realmente contiene patentes de todo el mundo. Se trata de un fondo documental de la Oficina Europea de Patentes, con 81 oficinas de patentes, que contiene más de 70 millones de documentos.

**Oficina Española de Patentes y Marcas:** <http://www.oepm.es>

Página del Organismo Público responsable del registro y la concesión de las distintas modalidades de Propiedad Industrial en España. En el enlace <http://invenes.oepm.es> accede a una base de datos de patentes, modelos de utilidad y diseños españoles desde 1929.

**Intellectual Property Office:** <http://www.ipo.gov.uk/home.htm>

Organismo oficial del gobierno responsable de la concesión de derechos de propiedad intelectual en el Reino Unido. Se puede acceder a una completa base de datos de patentes, marcas, diseños y derechos de autor.

**United States Patent and Trademark Office:**

<http://www.uspto.gov/products/library/search/>

Colección completa de patentes norteamericanas que permite la búsqueda en texto completo.

**Free Patents Online:** <http://www.freepatentsonline.com/>

Completa base de datos (no oficial) disponible libremente en Internet para búsqueda de patentes europeas, japonesas, americanas y chinas, creada por un ex investigador para facilitar la búsqueda de este tipo de Propiedad Industrial.

**Google patents beta:** <http://www.google.com/patents>

Google dispone de una base de datos, no oficial, de patentes, con cerca de 7 millones de patentes.

➤ ***MATERIAL CIENTÍFICO: REVISTAS, INFORMES DE INVESTIGACIÓN Y TESIS DOCTORALES***

**DOAB (Directory of Open Access Books):** <http://www.doabooks.org/>

DOAB es un servicio que permite descubrir libros revisados por pares y publicados bajo una licencia Open Access. También ofrece la posibilidad de buscar en el índice la información sobre estos libros, con enlaces al texto completo de las publicaciones en el repositorio o sitio web del editor. El servicio cuenta ya con la participación de numerosos editores con cientos de libros. DOAB, Directory of Open Access Books, está gestionado por OAPEN Foundation en cooperación con SemperTool.

**INGeBOOK:** <http://www.ingebook.com/ib/>

Plataforma online de libros electrónicos sobre matemáticas aplicadas, física aplicada y en general sobre temas relacionados con ciencia, ingeniería y arquitectura.

**Mienciclo Universal:** <http://www.mienciclo.es/enciclo/index.php/Portada>

La antigua Britannica Universal Mienciclo pasa a denominarse Mienciclo Universal. Mienciclo Universal es una plataforma que ofrece una enciclopedia universal

---

así como diversas obras de referencia en lengua castellana de reconocido prestigio, en el marco de colaboración internacional con diversas editoriales

**Netbiblo:** <http://www.netbiblo.com/home/main.mpx>

Netbiblo es una editorial científico-técnica cuyo objetivo es la publicación de obras especializadas. El catálogo, esencialmente compuesto por monografías en castellano en formato digital, se ha ido elaborando gracias a la indispensable colaboración de autores procedentes de las principales universidades y empresas nacionales e internacionales. El contenido de Netbiblo abarca todos los ámbitos del saber, especializándose en Ciencias Jurídicas y Sociales, y Humanidades y Ciencias Aplicadas. La Universidad de Oviedo tiene acceso a la colección completa, compuesta por 280 títulos

**Referex Compendex:**

<http://www.engineeringvillage.com/controller/servlet/Controller>

Colección de libros electrónicos especializados en diversas áreas de la ingeniería dentro de la base de datos electrónica Compendex. La Universidad de Oviedo tiene contratadas varias colecciones que comprenden numerosos títulos.

**Science Direct Books**

<http://www.sciencedirect.com/>

Colección de libros electrónicos editados por Elsevier y alojados en la plataforma ScienceDirect de la que la Universidad de Oviedo ha contratado varias series. Dispone de una amplia base de datos para consulta de artículos científicos.

**TDR:**

<http://www.tdx.cat/>

TDR es una base de datos que contiene tesis doctorales leídas en algunas de las universidades participantes en la red. Permite hacer búsquedas por autor, título, materia, universidad, etc. y da acceso al texto completo de la tesis.

**Dialnet:** <http://dialnet.unirioja.es/>

Base de datos que constituye un depósito o repositorio de acceso a la literatura

---

científica hispana a texto completo. Contiene revistas y artículos, documentos de trabajo, partes de libros colectivos, tesis doctorales y referencias de libros.

**TESEO:**

<http://www.educacion.es/teseo>

Página dependiente del Ministerio de Educación. Están todas las tesis leídas en España, pero no se tiene acceso a ellas libremente, por lo que para lo que puede servir es para extraer información sobre títulos relacionados la búsqueda.

**Repositorio institucional de la Universidad (RUO):**

<https://acceso.uniovi.es/dspace/,DanaInfo=dspace.sheol.uniovi.es>

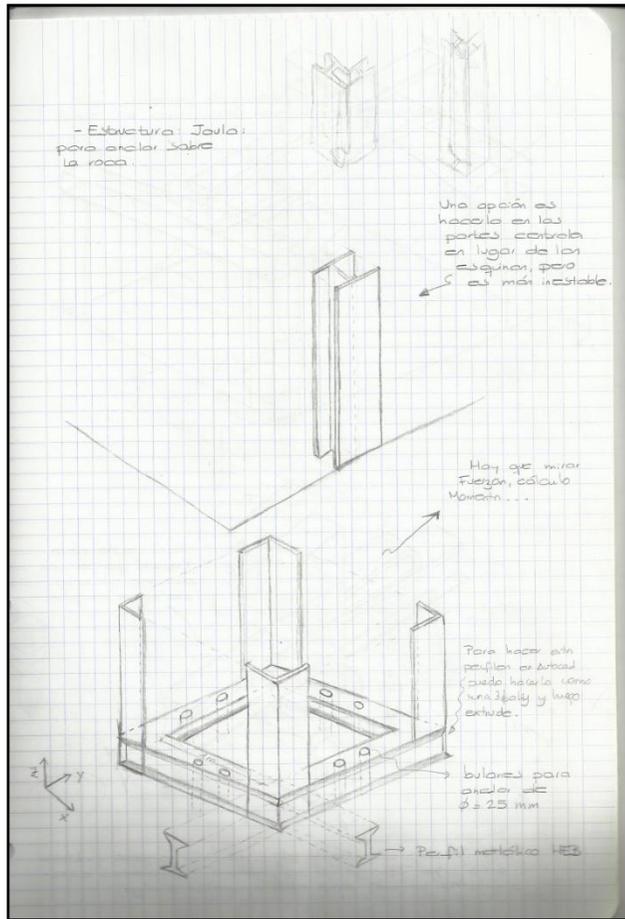
La producción científica y académica de la Universidad de Oviedo publicada en acceso abierto y versiones digitales de impresos y manuscritos antiguos Archivo electrónico que contiene el fondo antiguo digitalizado por la Biblioteca de la Universidad y la producción científica o académica que los miembros de la institución decidan publicar en acceso abierto (proyectos, artículos científicos, tesis, etc.).

**Web Of Knowledge del Sistema Español de Ciencia y Tecnología:**

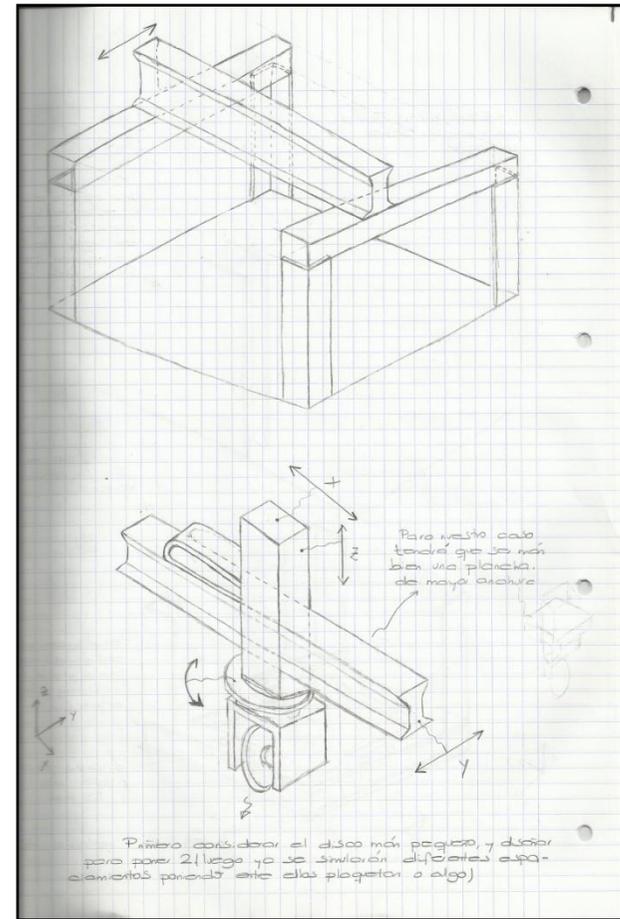
<http://www.accesowok.fecyt.es/>

La Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, FECYT, gestiona la licencia nacional de Web Of Knowledge (WOK) para que las Universidades, Organismos Públicos de Investigación, Centros Tecnológicos, Parques Científicos, Servicios de Investigación Agraria, Servicios de Investigación Sanitaria y Administración Pública de I+D tengan acceso a esta base de datos. Gracias a esta única gestión, todas estas instituciones obtienen inmejorables condiciones económicas y la accesibilidad tecnológica necesaria para poder consultar la WOK.

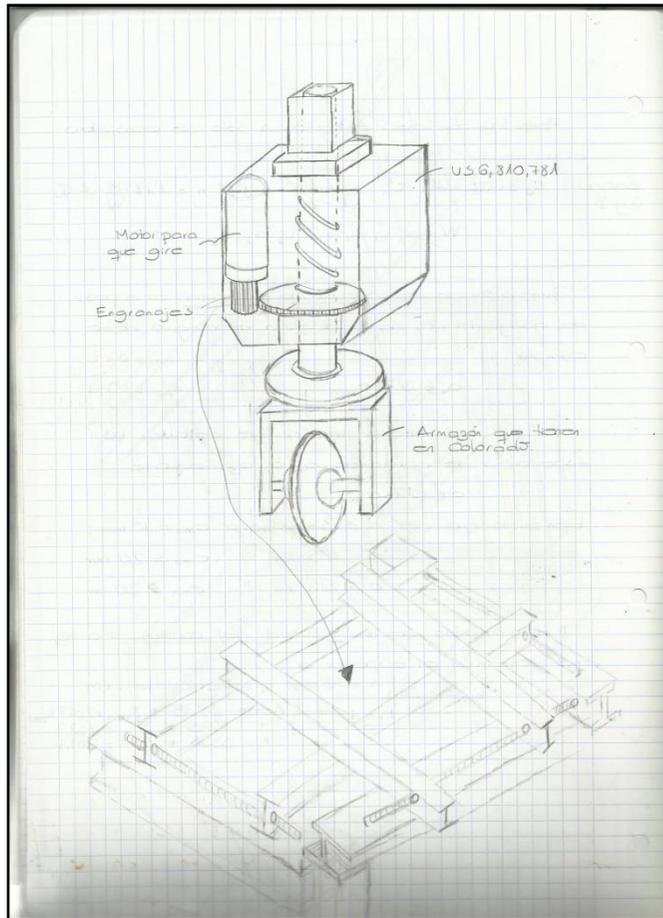
# **ANEXO II: BOCETOS INICIALES DE DESARROLLO DEL DISPOSITIVO**



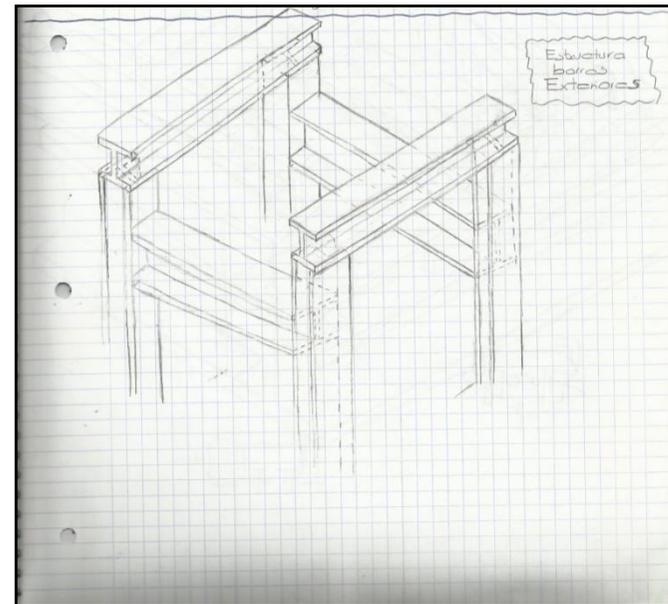
Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte inferior



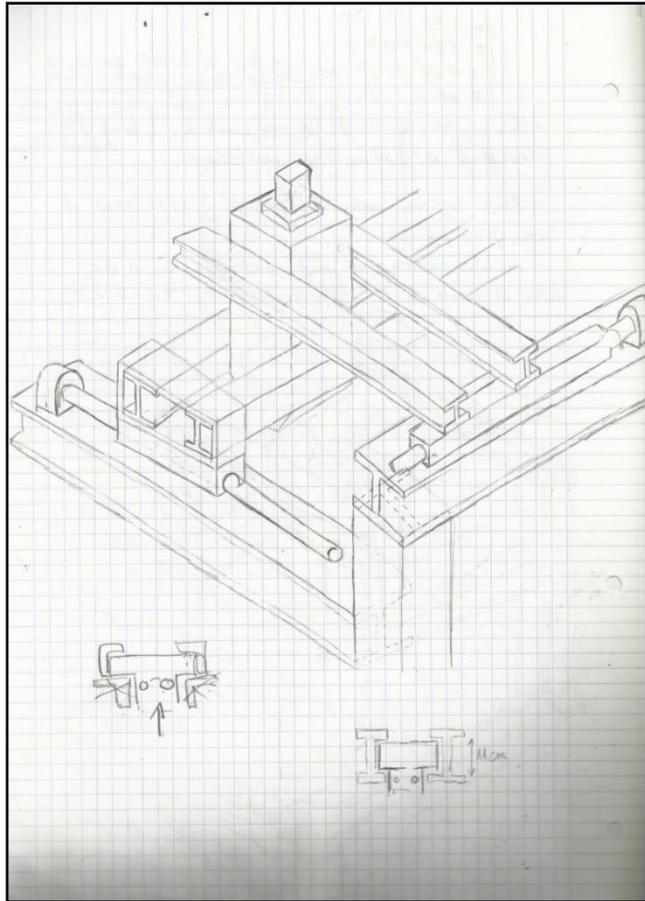
Boceto preliminar para el armazón estructural y disposición disco corte



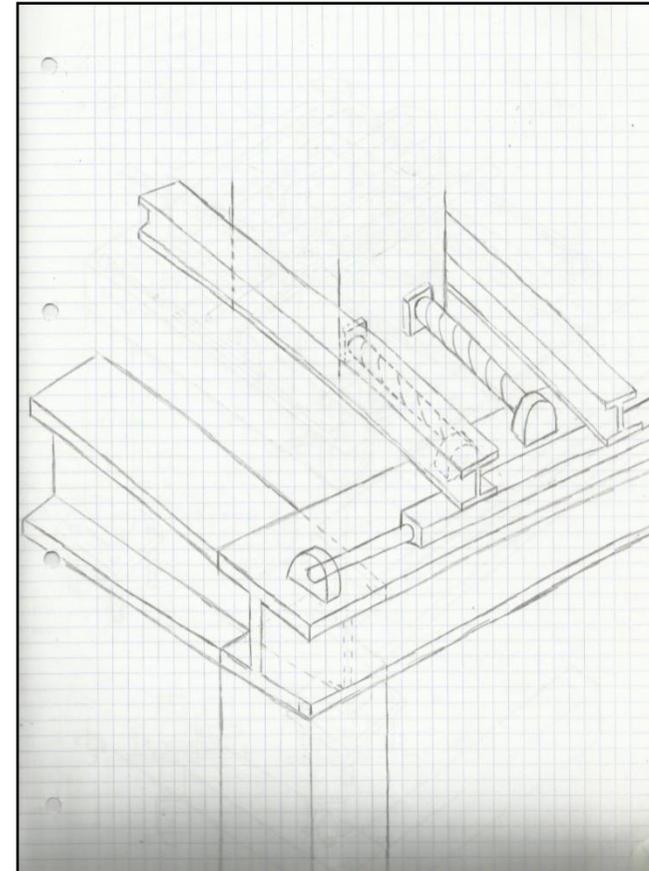
Boceto preliminar para el mecanismo de rotación



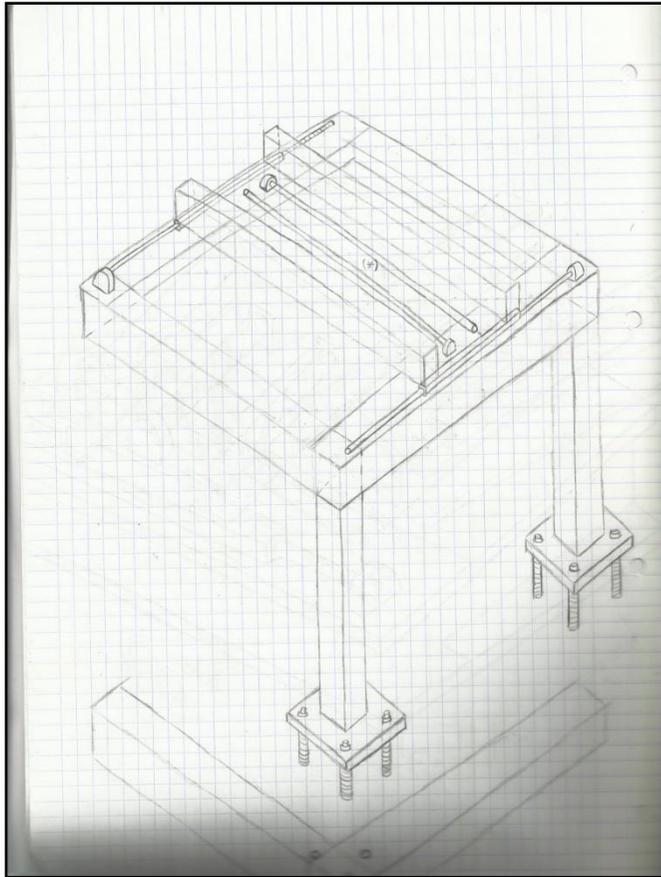
Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte superior



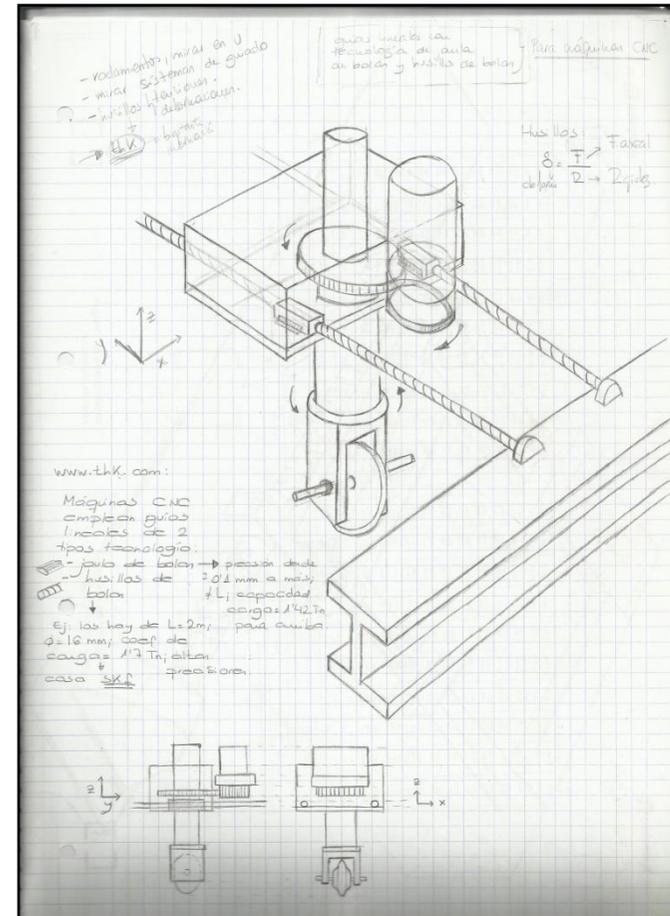
**Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte superior y mecanismo de desplazamiento horizontal**



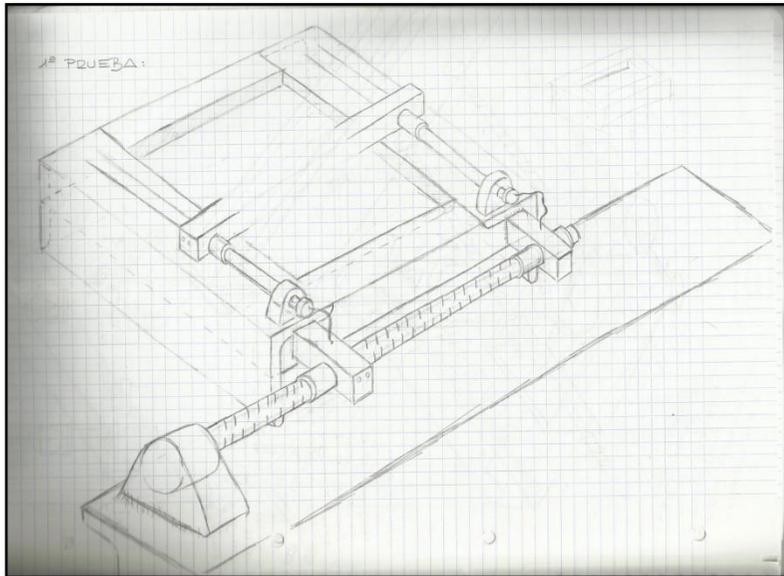
**Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte superior y mecanismo de desplazamiento horizontal**



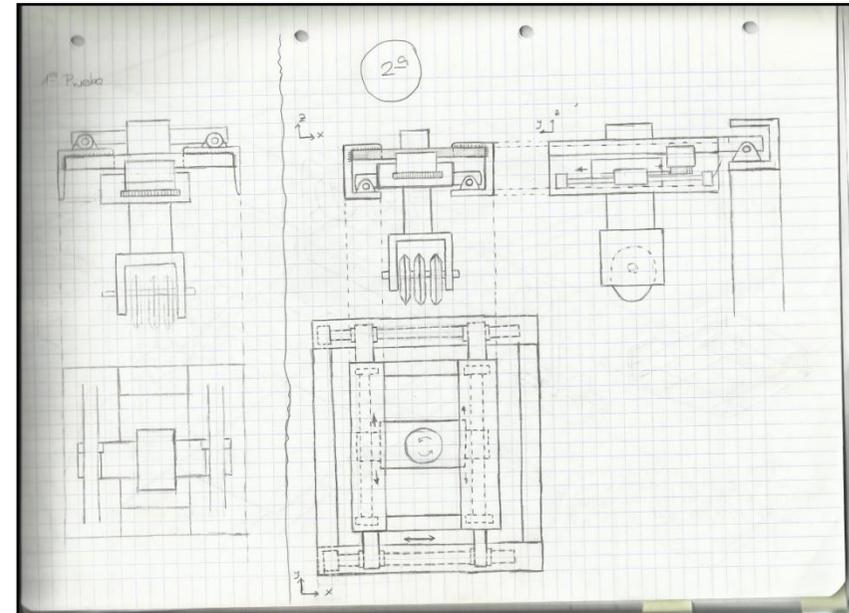
Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte superior y mecanismo de desplazamiento horizontal



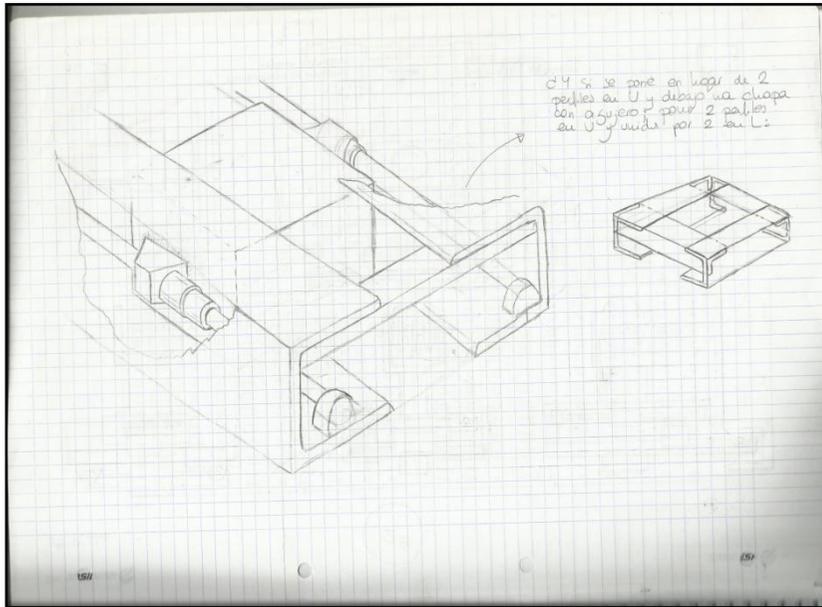
Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento rotacional



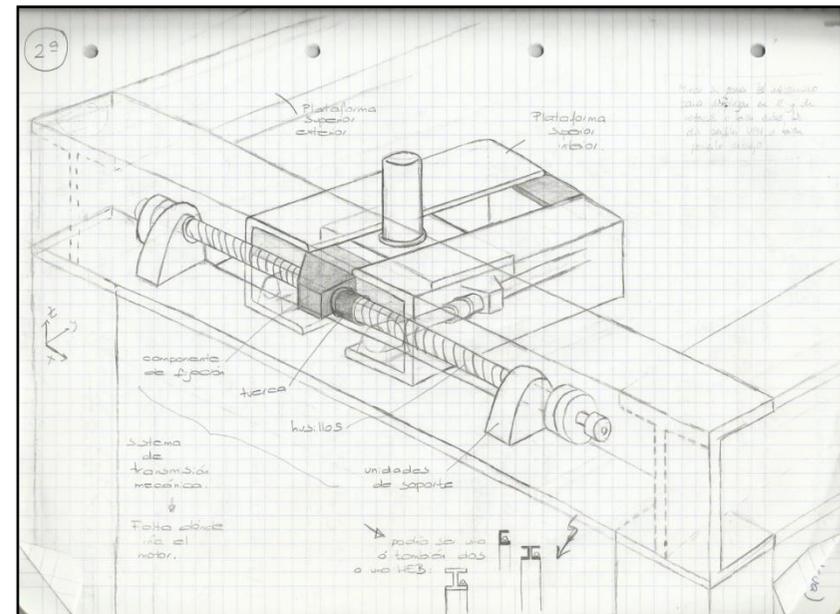
Boceto preliminar para el armazón estructural en su parte superior y mecanismo de desplazamiento horizontal



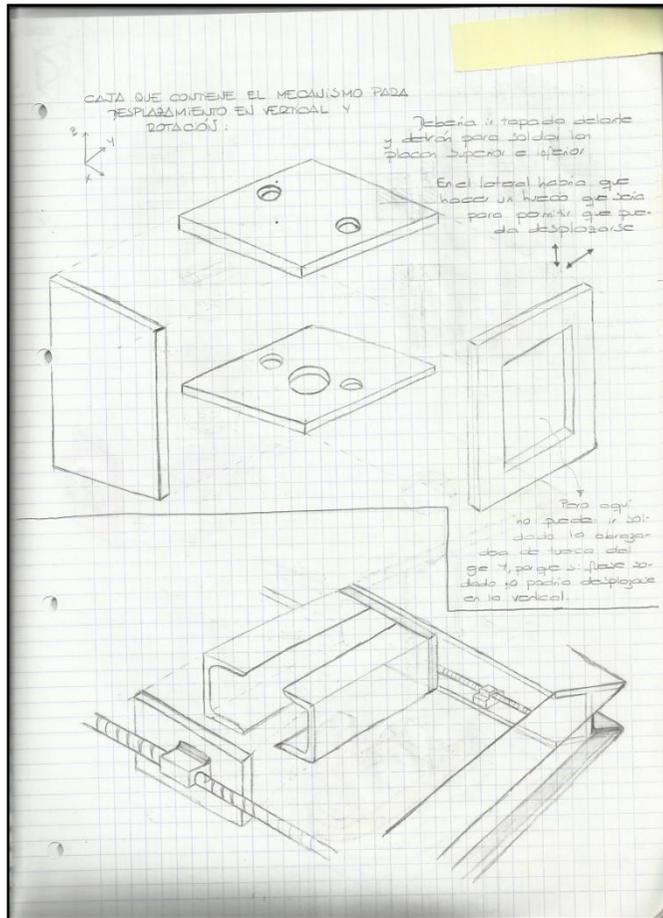
Vista en alzado, perfil y planta del dispositivo



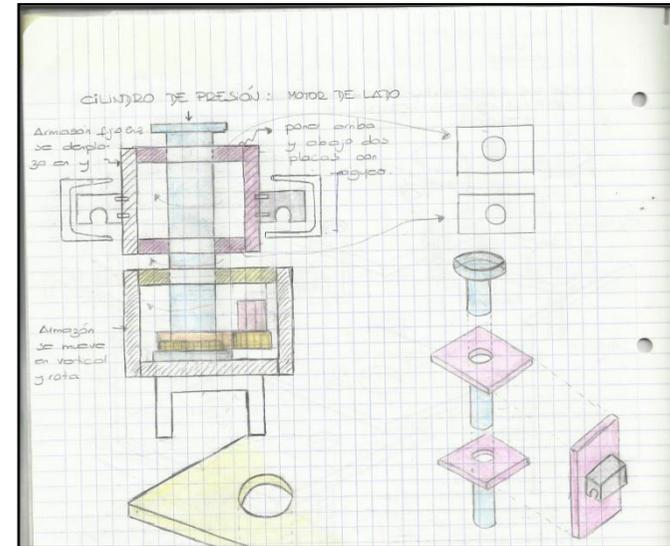
Detalle de perfiles y tipo de unión posible entre perfiles



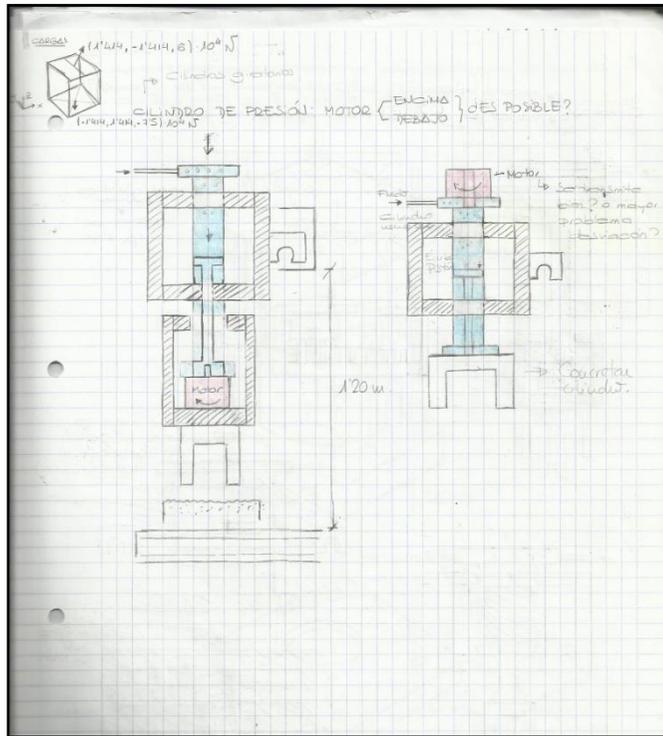
Boceto preliminar de la parte superior del dispositivo



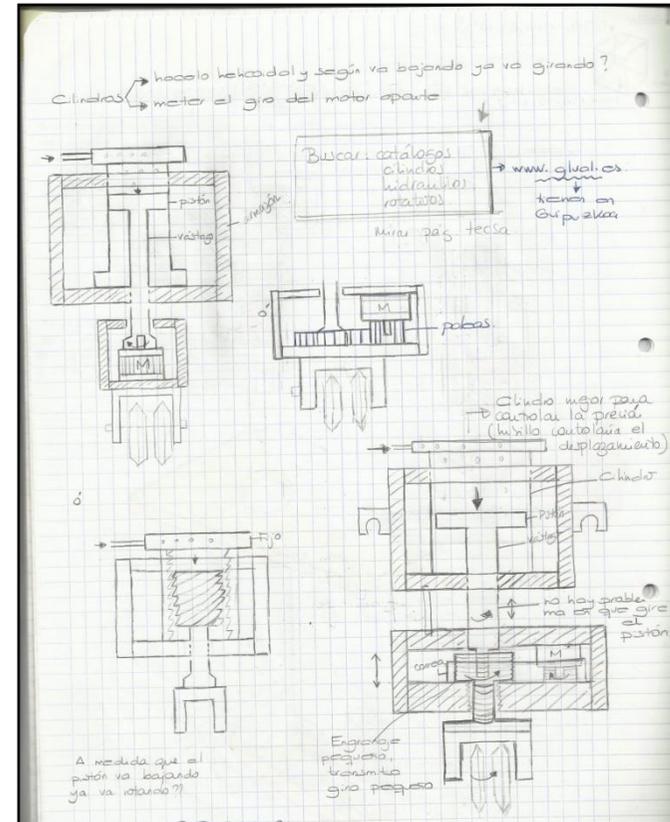
Boceto preliminar para el armazón estructural y posible unión entre perfiles



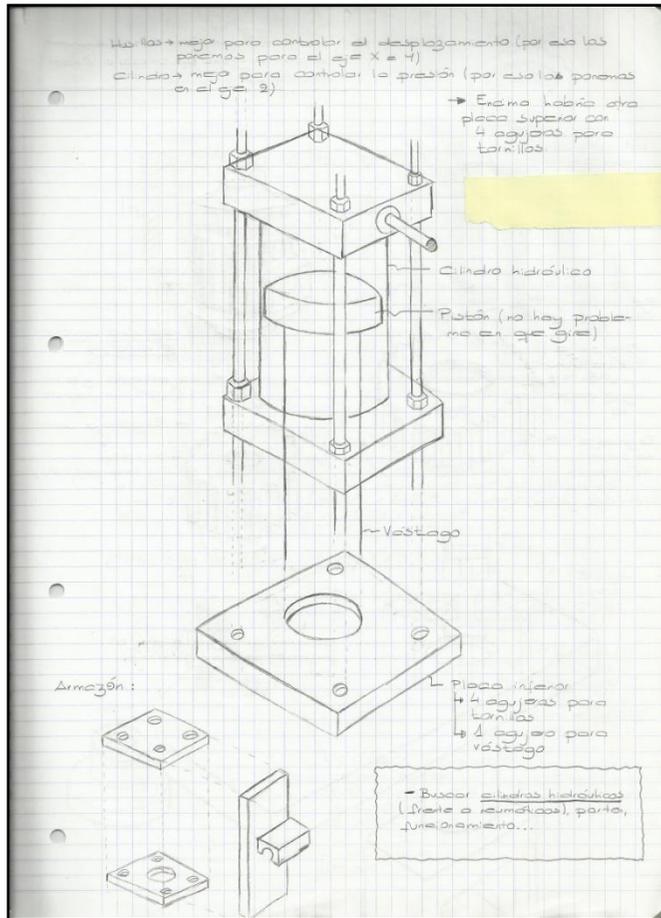
Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento vertical y rotacional



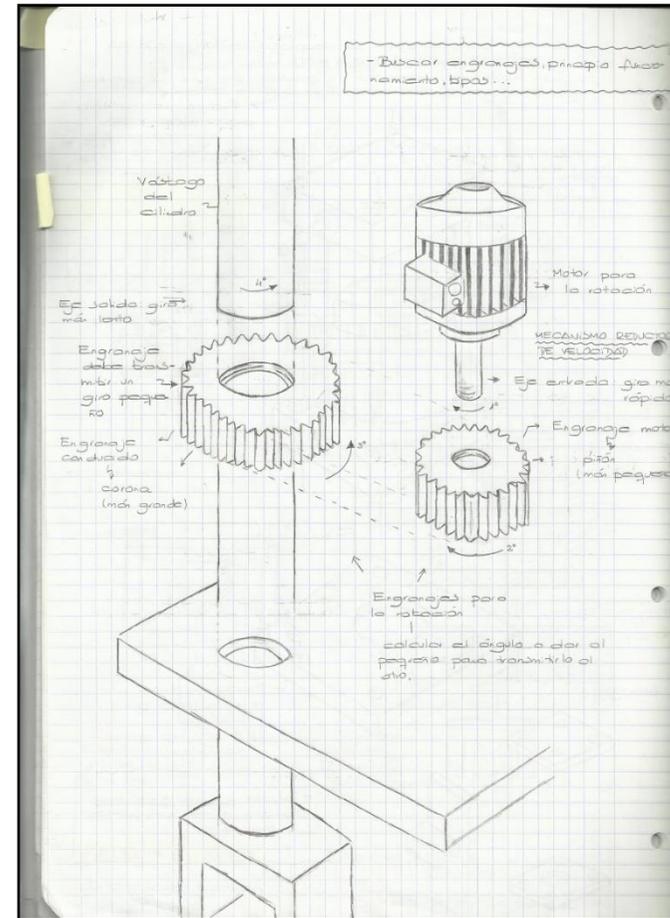
Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento vertical y rotacional



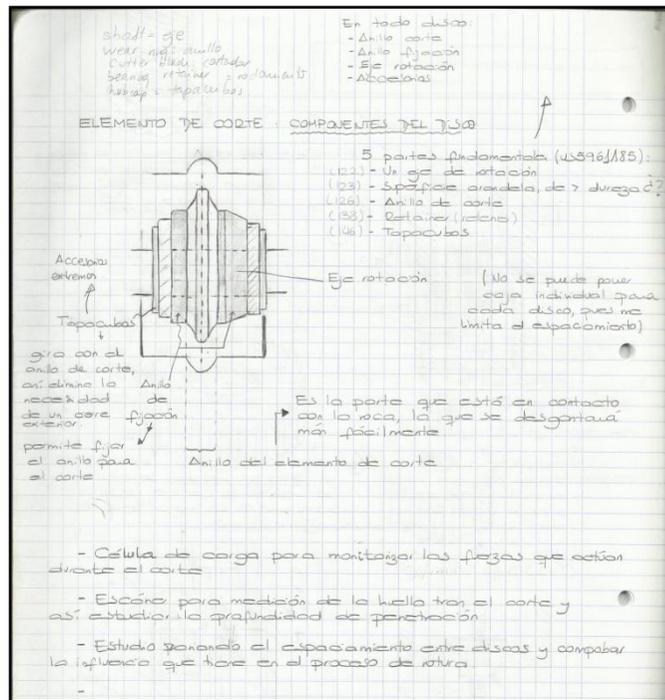
Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento vertical y rotacional



Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento vertical



Boceto preliminar para el mecanismo de desplazamiento rotacional



Boceto elementos componentes del disco de corte

# ANEXO III: RESULTADOS NUMÉRICOS DE MODELIZACIÓN

# VALORES NUMÉRICOS OBTENIDOS CON FLAC 3D

**VALORES NUMÉRICOS DE LOS ESFUERZOS EN LAS BARRAS**

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
1	1	-3930,00	-26,73	2967,00
	3	-3930,00	-26,73	2967,00
2	3	-3929,00	-26,74	2968,00
	4	-3929,00	-26,74	2968,00
3	4	-3928,00	-26,78	2969,00
	5	-3928,00	-26,78	2969,00
4	5	-3928,00	-26,74	2970,00
	6	-3928,00	-26,74	2970,00
5	6	-3927,00	-26,75	2970,00
	7	-3927,00	-26,75	2970,00
6	7	-3927,00	-26,90	2971,00
	8	-3927,00	-26,90	2971,00
7	8	-3926,00	-27,11	2971,00
	9	-3926,00	-27,11	2971,00
8	9	-3926,00	-27,29	2972,00
	10	-3926,00	-27,29	2972,00
9	10	-3926,00	-27,56	2972,00
	11	-3926,00	-27,56	2972,00
10	11	-3926,00	-27,77	2972,00
	2	-3926,00	-27,77	2972,00
11	2	-2031,00	-22,27	2843,00
	13	-2031,00	-22,27	2843,00
12	13	-2032,00	-21,97	2843,00
	14	-2032,00	-21,97	2843,00
13	14	-2032,00	-22,02	2842,00
	15	-2032,00	-22,02	2842,00
14	15	-2033,00	-22,17	2842,00
	16	-2033,00	-22,17	2842,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
15	16	-2034,00	-22,33	2842,00
	17	-2034,00	-22,33	2842,00
16	17	-2035,00	-21,95	2841,00
	18	-2035,00	-21,95	2841,00
17	18	-2035,00	-21,67	2841,00
	19	-2035,00	-21,67	2841,00
18	19	-2036,00	-21,74	2840,00
	20	-2036,00	-21,74	2840,00
19	20	-2037,00	-21,24	2840,00
	21	-2037,00	-21,24	2840,00
20	21	-2038,00	-20,98	2839,00
	12	-2038,00	-20,98	2839,00
21	12	2392,00	-25,83	2975,00
	23	2392,00	-25,83	2975,00
22	23	2392,00	-25,87	2975,00
	24	2392,00	-25,87	2975,00
23	24	2392,00	-26,03	2975,00
	25	2392,00	-26,03	2975,00
24	25	2391,00	-26,31	2975,00
	26	2391,00	-26,31	2975,00
25	26	2390,00	-26,26	2975,00
	27	2390,00	-26,26	2975,00
26	27	2390,00	-26,13	2976,00
	28	2390,00	-26,13	2976,00
27	28	2390,00	-26,04	2976,00
	29	2390,00	-26,04	2976,00
28	29	2389,00	-25,97	2976,00
	30	2389,00	-25,97	2976,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
29	30	2388,00	-25,90	2977,00
	31	2388,00	-25,90	2977,00
30	31	2386,00	-25,79	2978,00
	22	2386,00	-25,79	2978,00
31	22	4500,00	-23,78	2843,00
	32	4500,00	-23,78	2843,00
32	32	4501,00	-23,67	2842,00
	33	4501,00	-23,67	2842,00
33	33	4501,00	-23,56	2840,00
	34	4501,00	-23,56	2840,00
34	34	4502,00	-23,42	2839,00
	35	4502,00	-23,42	2839,00
35	35	4503,00	-23,28	2839,00
	36	4503,00	-23,28	2839,00
36	36	4503,00	-23,17	2838,00
	37	4503,00	-23,17	2838,00
37	37	4503,00	-23,19	2837,00
	38	4503,00	-23,19	2837,00
38	38	4504,00	-23,18	2837,00
	39	4504,00	-23,18	2837,00
39	39	4504,00	-23,26	2836,00
	40	4504,00	-23,26	2836,00
40	40	4504,00	-23,37	2836,00
	1	4504,00	-23,37	2836,00
41	2	10540,00	14,45	20140,00
	42	10540,00	14,45	20140,00
42	42	10550,00	13,88	20130,00
	43	10550,00	13,88	20130,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
43	43	10550,00	13,48	20130,00
	44	10550,00	13,48	20130,00
44	44	10540,00	13,01	20140,00
	45	10540,00	13,01	20140,00
45	45	10530,00	12,53	20140,00
	41	10530,00	12,53	20140,00
46	12	708,90	139,60	18670,00
	46	708,90	139,60	18670,00
47	46	713,40	141,60	18670,00
	47	713,40	141,60	18670,00
48	47	712,10	143,70	18670,00
	48	712,10	143,70	18670,00
49	48	704,80	145,70	18670,00
	49	704,80	145,70	18670,00
50	49	692,10	147,50	18670,00
	41	692,10	147,50	18670,00
51	22	-9140,00	-8,03	-17360,00
	50	-9140,00	-8,03	-17360,00
52	50	-9138,00	-7,68	-17370,00
	51	-9138,00	-7,68	-17370,00
53	51	-9140,00	-7,24	-17360,00
	52	-9140,00	-7,24	-17360,00
54	52	-9147,00	-7,07	-17360,00
	53	-9147,00	-7,07	-17360,00
55	53	-9159,00	-6,89	-17350,00
	41	-9159,00	-6,89	-17350,00
56	1	712,30	160,30	-18830,00
	54	712,30	160,30	-18830,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
57	54	717,10	161,70	-18830,00
	55	717,10	161,70	-18830,00
58	55	715,90	163,20	-18830,00
	56	715,90	163,20	-18830,00
59	56	708,80	164,60	-18830,00
	57	708,80	164,60	-18830,00
60	57	695,80	166,00	-18830,00
	41	695,80	166,00	-18830,00
61	1	14930,00	-5091,00	-3521,00
	59	14930,00	-5091,00	-3521,00
62	59	14930,00	-5083,00	-3521,00
	60	14930,00	-5083,00	-3521,00
63	60	14940,00	-5076,00	-3522,00
	61	14940,00	-5076,00	-3522,00
64	61	14940,00	-5071,00	-3523,00
	62	14940,00	-5071,00	-3523,00
65	62	14940,00	-5068,00	-3525,00
	63	14940,00	-5068,00	-3525,00
66	63	14940,00	-5067,00	-3527,00
	64	14940,00	-5067,00	-3527,00
67	64	14940,00	-5067,00	-3530,00
	65	14940,00	-5067,00	-3530,00
68	65	14940,00	-5068,00	-3533,00
	66	14940,00	-5068,00	-3533,00
69	66	14930,00	-5072,00	-3537,00
	67	14930,00	-5072,00	-3537,00
70	67	14930,00	-5077,00	-3541,00
	58	14930,00	-5077,00	-3541,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
71	2	8095,00	-5443,00	-3527,00
	69	8095,00	-5443,00	-3527,00
72	69	8099,00	-5439,00	-3523,00
	70	8099,00	-5439,00	-3523,00
73	70	8103,00	-5435,00	-3521,00
	71	8103,00	-5435,00	-3521,00
74	71	8106,00	-5432,00	-3519,00
	72	8106,00	-5432,00	-3519,00
75	72	8108,00	-5430,00	-3518,00
	73	8108,00	-5430,00	-3518,00
76	73	8109,00	-5429,00	-3516,00
	74	8109,00	-5429,00	-3516,00
77	74	8110,00	-5429,00	-3515,00
	75	8110,00	-5429,00	-3515,00
78	75	8109,00	-5430,00	-3514,00
	76	8109,00	-5430,00	-3514,00
79	76	8108,00	-5432,00	-3513,00
	77	8108,00	-5432,00	-3513,00
80	77	8106,00	-5435,00	-3513,00
	68	8106,00	-5435,00	-3513,00
81	12	15070,00	-1616,00	-2964,00
	79	15070,00	-1616,00	-2964,00
82	79	15070,00	-1616,00	-2960,00
	80	15070,00	-1616,00	-2960,00
83	80	15070,00	-1616,00	-2957,00
	81	15070,00	-1616,00	-2957,00
84	81	15070,00	-1617,00	-2954,00
	82	15070,00	-1617,00	-2954,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
85	82	15070,00	-1618,00	-2951,00
	83	15070,00	-1618,00	-2951,00
86	83	15070,00	-1619,00	-2949,00
	84	15070,00	-1619,00	-2949,00
87	84	15070,00	-1622,00	-2948,00
	85	15070,00	-1622,00	-2948,00
88	85	15070,00	-1624,00	-2946,00
	86	15070,00	-1624,00	-2946,00
89	86	15070,00	-1628,00	-2945,00
	87	15070,00	-1628,00	-2945,00
90	87	15070,00	-1632,00	-2944,00
	78	15070,00	-1632,00	-2944,00
91	22	21910,00	-1974,00	-4100,00
	89	21910,00	-1974,00	-4100,00
92	89	21910,00	-1972,00	-4100,00
	90	21910,00	-1972,00	-4100,00
93	90	21910,00	-1971,00	-4100,00
	91	21910,00	-1971,00	-4100,00
94	91	21910,00	-1971,00	-4102,00
	92	21910,00	-1971,00	-4102,00
95	92	21910,00	-1971,00	-4105,00
	93	21910,00	-1971,00	-4105,00
96	93	21910,00	-1973,00	-4108,00
	94	21910,00	-1973,00	-4108,00
97	94	21910,00	-1976,00	-4112,00
	95	21910,00	-1976,00	-4112,00
98	95	21910,00	-1980,00	-4116,00
	96	21910,00	-1980,00	-4116,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
99	96	21910,00	-1984,00	-4121,00
	97	21910,00	-1984,00	-4121,00
100	97	21900,00	-1990,00	-4127,00
	88	21900,00	-1990,00	-4127,00
101	58	4864,00	-1613,00	18400,00
	99	4864,00	-1613,00	18400,00
102	99	4867,00	-1600,00	18400,00
	100	4867,00	-1600,00	18400,00
103	100	4866,00	-1588,00	18400,00
	101	4866,00	-1588,00	18400,00
104	101	4864,00	-1576,00	18400,00
	102	4864,00	-1576,00	18400,00
105	102	4858,00	-1563,00	18400,00
	98	4858,00	-1563,00	18400,00
106	98	-2205,00	5415,00	-11590,00
	103	-2205,00	5415,00	-11590,00
107	103	-2198,00	5423,00	-11590,00
	104	-2198,00	5423,00	-11590,00
108	104	-2194,00	5432,00	-11580,00
	105	-2194,00	5432,00	-11580,00
109	105	-2191,00	5440,00	-11580,00
	106	-2191,00	5440,00	-11580,00
110	106	-2190,00	5447,00	-11580,00
	68	-2190,00	5447,00	-11580,00
111	68	13,64	1322,00	3471,00
	108	13,64	1322,00	3471,00
112	108	14,45	1322,00	3471,00
	109	14,45	1322,00	3471,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
113	109	14,98	1322,00	3471,00
	110	14,98	1322,00	3471,00
114	110	15,75	1321,00	3471,00
	111	15,75	1321,00	3471,00
115	111	16,30	1321,00	3471,00
	107	16,30	1321,00	3471,00
116	107	17,35	1321,00	3471,00
	112	17,35	1321,00	3471,00
117	112	17,54	1321,00	3471,00
	113	17,54	1321,00	3471,00
118	113	17,45	1321,00	3471,00
	114	17,45	1321,00	3471,00
119	114	17,02	1320,00	3471,00
	115	17,02	1320,00	3471,00
120	115	16,85	1321,00	3471,00
	78	16,85	1321,00	3471,00
121	78	-4264,00	-1622,00	-11600,00
	117	-4264,00	-1622,00	-11600,00
122	117	-4265,00	-1631,00	-11600,00
	118	-4265,00	-1631,00	-11600,00
123	118	-4267,00	-1640,00	-11590,00
	119	-4267,00	-1640,00	-11590,00
124	119	-4270,00	-1648,00	-11590,00
	120	-4270,00	-1648,00	-11590,00
125	120	-4274,00	-1657,00	-11590,00
	116	-4274,00	-1657,00	-11590,00
126	116	2807,00	5512,00	18420,00
	121	2807,00	5512,00	18420,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
127	121	2814,00	5498,00	18420,00
	122	2814,00	5498,00	18420,00
128	122	2818,00	5484,00	18420,00
	123	2818,00	5484,00	18420,00
129	123	2819,00	5470,00	18430,00
	124	2819,00	5470,00	18430,00
130	124	2816,00	5457,00	18430,00
	88	2816,00	5457,00	18430,00
131	88	-3457,00	1317,00	3468,00
	126	-3457,00	1317,00	3468,00
132	126	-3457,00	1318,00	3468,00
	127	-3457,00	1318,00	3468,00
133	127	-3457,00	1318,00	3469,00
	128	-3457,00	1318,00	3469,00
134	128	-3457,00	1318,00	3469,00
	129	-3457,00	1318,00	3469,00
135	129	-3457,00	1318,00	3469,00
	125	-3457,00	1318,00	3469,00
136	125	-3457,00	1318,00	3469,00
	130	-3457,00	1318,00	3469,00
137	130	-3458,00	1319,00	3468,00
	131	-3458,00	1319,00	3468,00
138	131	-3458,00	1319,00	3468,00
	132	-3458,00	1319,00	3468,00
139	132	-3459,00	1319,00	3468,00
	133	-3459,00	1319,00	3468,00
140	133	-3460,00	1319,00	3467,00
	58	-3460,00	1319,00	3467,00

Barras	Nodos	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	F <sub>z</sub> (N)
141	98	-6965,00	7074,00	-29990,00
	135	-6965,00	7074,00	-29990,00
142	135	-6968,00	7096,00	-29990,00
	136	-6968,00	7096,00	-29990,00
143	136	-6984,00	7114,00	-29980,00
	137	-6984,00	7114,00	-29980,00
144	137	-7012,00	7127,00	-29970,00
	138	-7012,00	7127,00	-29970,00
145	138	-7054,00	7131,00	-29960,00
	134	-7054,00	7131,00	-29960,00
146	134	7093,00	-7141,00	30010,00
	139	7093,00	-7141,00	30010,00
147	139	7135,00	-7124,00	30000,00
	140	7135,00	-7124,00	30000,00
148	140	7164,00	-7105,00	30000,00
	141	7164,00	-7105,00	30000,00
149	141	7180,00	-7090,00	30000,00
	142	7180,00	-7090,00	30000,00
150	142	7183,00	-7081,00	30000,00
	116	7183,00	-7081,00	30000,00

**VALORES NUMÉRICOS DE LOS MOMENTOS EN LAS BARRAS**

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
1	1	-1,53	-4009,00	-26,72
	3	-1,53	-3653,00	-23,51
2	3	-1,52	-3653,00	-23,57
	4	-1,52	-3297,00	-20,36
3	4	-1,52	-3297,00	-20,41
	5	-1,52	-2940,00	-17,20
4	5	-1,51	-2941,00	-17,24
	6	-1,51	-2584,00	-14,03
5	6	-1,51	-2584,00	-14,06
	7	-1,51	-2228,00	-10,85
6	7	-1,50	-2228,00	-10,88
	8	-1,50	-1871,00	-7,66
7	8	-1,50	-1871,00	-7,70
	9	-1,50	-1515,00	-4,45
8	9	-1,50	-1515,00	-4,48
	10	-1,50	-1158,00	-1,20
9	10	-1,50	-1158,00	-1,22
	11	-1,50	-801,50	2,08
10	11	-1,50	-801,60	2,05
	2	-1,50	-444,90	5,38
11	2	1,03	962,80	-3,82
	13	1,03	1304,00	-1,15
12	13	1,03	1304,00	-1,18
	14	1,03	1645,00	1,46
13	14	1,03	1645,00	1,45
	15	1,03	1986,00	4,09
14	15	1,03	1986,00	4,07
	16	1,03	2327,00	6,73

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
15	16	1,03	2327,00	6,71
	17	1,03	2668,00	9,39
16	17	1,03	2668,00	9,37
	18	1,03	3009,00	12,01
17	18	1,04	3009,00	11,98
	19	1,04	3350,00	14,58
18	19	1,04	3350,00	14,56
	20	1,04	3691,00	17,17
19	20	1,05	3691,00	17,15
	21	1,05	4032,00	19,70
20	21	1,06	4032,00	19,69
	12	1,06	4372,00	22,21
21	12	1,52	130,50	-23,37
	23	1,52	487,50	-20,27
22	23	1,52	487,50	-20,23
	24	1,52	844,50	-17,13
23	24	1,52	844,50	-17,13
	25	1,52	1201,00	-14,00
24	25	1,51	1201,00	-13,99
	26	1,51	1558,00	-10,84
25	26	1,51	1558,00	-10,85
	27	1,51	1915,00	-7,70
26	27	1,51	1915,00	-7,73
	28	1,51	2273,00	-4,59
27	28	1,51	2273,00	-4,63
	29	1,51	2630,00	-1,51
28	29	1,51	2630,00	-1,54
	30	1,51	2987,00	1,58

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
29	30	1,51	2987,00	1,55
	31	1,51	3344,00	4,66
30	31	1,51	3344,00	4,60
	22	1,51	3701,00	7,69
31	22	-1,02	-3917,00	-2,79
	32	-1,02	-3575,00	6,29E-02
32	32	-1,02	-3575,00	-5,75E-04
	33	-1,02	-3234,00	2,84
33	33	-1,02	-3234,00	2,80
	34	-1,02	-2894,00	5,62
34	34	-1,03	-2894,00	5,57
	35	-1,03	-2553,00	8,39
35	35	-1,03	-2553,00	8,35
	36	-1,03	-2212,00	11,14
36	36	-1,03	-2212,00	11,11
	37	-1,03	-1872,00	13,89
37	37	-1,03	-1872,00	13,88
	38	-1,03	-1531,00	16,66
38	38	-1,04	-1531,00	16,63
	39	-1,04	-1191,00	19,41
39	39	-1,04	-1191,00	19,40
	40	-1,04	-850,30	22,19
40	40	-1,04	-850,30	22,18
	1	-1,04	-509,90	24,99
41	2	-1,45	-6869,00	5,84
	42	-1,45	-3452,00	3,39
42	42	-1,46	-3452,00	3,31
	43	-1,46	-35,35	0,95

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
43	43	-1,48	-35,39	0,96
	44	-1,48	3381,00	-1,33
44	44	-1,48	3381,00	-1,25
	45	-1,48	6798,00	-3,46
45	45	-1,49	6798,00	-3,29
	41	-1,49	10220,00	-5,42
46	12	7,67	-5632,00	47,16
	46	7,67	-2463,00	23,47
47	46	7,65	-2463,00	23,77
	47	7,65	705,40	-0,27
48	47	7,65	705,40	-0,34
	48	7,65	3874,00	-24,72
49	48	7,63	3874,00	-25,14
	49	7,63	7042,00	-49,86
50	49	7,57	7042,00	-50,63
	41	7,57	10210,00	-75,66
51	22	-0,96	4528,00	-1,79
	50	-0,96	1581,00	-0,43
52	50	-0,96	1581,00	-0,42
	51	-0,96	-1366,00	0,88
53	51	-0,97	-1366,00	0,86
	52	-0,97	-4313,00	2,09
54	52	-0,98	-4313,00	2,02
	53	-0,98	-7259,00	3,22
55	53	-0,98	-7259,00	3,11
	41	-0,98	-10200,00	4,28
56	1	-5,20	5767,00	53,80
	54	-5,20	2571,00	26,59

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
57	54	-5,20	2572,00	26,78
	55	-5,20	-624,00	-0,67
58	55	-5,20	-624,00	-0,73
	56	-5,20	-3819,00	-28,42
59	56	-5,19	-3819,00	-28,72
	57	-5,19	-7015,00	-56,65
60	57	-5,14	-7015,00	-57,18
	41	-5,14	-10210,00	-85,35
61	1	-1,91	-64,33	-3573,00
	59	-1,91	-486,80	-2962,00
62	59	-1,74	-486,80	-2962,00
	60	-1,74	-909,30	-2352,00
63	60	-1,48	-909,20	-2352,00
	61	-1,48	-1332,00	-1743,00
64	61	-1,20	-1332,00	-1743,00
	62	-1,20	-1755,00	-1135,00
65	62	-0,97	-1754,00	-1135,00
	63	-0,97	-2177,00	-526,40
66	63	-0,83	-2177,00	-526,40
	64	-0,83	-2601,00	81,60
67	64	-0,86	-2601,00	81,60
	65	-0,86	-3024,00	689,60
68	65	-1,10	-3024,00	689,60
	66	-1,10	-3448,00	1298,00
69	66	-1,64	-3448,00	1298,00
	67	-1,64	-3873,00	1906,00
70	67	-2,52	-3873,00	1906,00
	58	-2,52	-4298,00	2516,00

Barras	Nodos	Mx (Nm)	My (Nm)	Mz (Nm)
71	2	6,52	4412,00	-3892,00
	69	6,52	3989,00	-3239,00
72	69	4,98	3989,00	-3239,00
	70	4,98	3566,00	-2586,00
73	70	3,88	3566,00	-2586,00
	71	3,88	3143,00	-1934,00
74	71	3,15	3143,00	-1934,00
	72	3,15	2721,00	-1282,00
75	72	2,74	2721,00	-1283,00
	73	2,74	2299,00	-630,90
76	73	2,56	2298,00	-630,90
	74	2,56	1876,00	20,63
77	74	2,57	1876,00	20,58
	75	2,57	1455,00	672,10
78	75	2,68	1455,00	672,10
	76	2,68	1033,00	1324,00
79	76	2,85	1033,00	1324,00
	77	2,85	611,50	1976,00
80	77	2,99	611,50	1976,00
	68	2,99	190,00	2628,00
81	12	1,18	3858,00	-397,00
	79	1,18	3503,00	-203,10
82	79	1,09	3502,00	-203,10
	80	1,09	3147,00	-9,12
83	80	1,09	3147,00	-9,19
	81	1,09	2792,00	184,80
84	81	1,15	2792,00	184,80
	82	1,15	2438,00	378,80

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
85	82	1,26	2438,00	378,70
	83	1,26	2084,00	572,90
86	83	1,40	2084,00	572,90
	84	1,40	1730,00	767,20
87	84	1,56	1730,00	767,20
	85	1,56	1376,00	961,80
88	85	1,72	1376,00	961,80
	86	1,72	1023,00	1157,00
89	86	1,86	1023,00	1157,00
	87	1,86	669,20	1352,00
90	87	1,97	669,20	1352,00
	78	1,97	315,90	1548,00
91	22	-3,11	498,20	-714,20
	89	-3,11	6,24	-477,30
92	89	-3,11	6,22	-477,30
	90	-3,11	-485,70	-240,60
93	90	-3,09	-485,80	-240,60
	91	-3,09	-977,80	-4,11
94	91	-3,09	-977,80	-4,14
	92	-3,09	-1470,00	232,40
95	92	-3,13	-1470,00	232,30
	93	-3,13	-1963,00	468,90
96	93	-3,24	-1963,00	468,80
	94	-3,24	-2456,00	705,60
97	94	-3,45	-2456,00	705,50
	95	-3,45	-2949,00	942,60
98	95	-3,78	-2949,00	942,50
	96	-3,78	-3443,00	1180,00

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
99	96	-4,27	-3443,00	1180,00
	97	-4,27	-3938,00	1418,00
100	97	-4,93	-3938,00	1418,00
	88	-4,93	-4433,00	1657,00
101	58	61,71	-4298,00	-665,50
	99	61,71	-2090,00	-471,90
102	99	61,83	-2091,00	-470,40
	100	61,83	117,00	-278,40
103	100	61,82	116,80	-278,40
	101	61,82	2325,00	-87,85
104	101	61,80	2325,00	-89,34
	102	61,80	4532,00	99,72
105	102	61,85	4533,00	96,90
	98	61,85	6741,00	284,50
106	98	-62,27	6762,00	2331,00
	103	-62,27	5371,00	1681,00
107	103	-61,19	5370,00	1685,00
	104	-61,19	3980,00	1034,00
108	104	-60,70	3979,00	1036,00
	105	-60,70	2589,00	384,70
109	105	-60,58	2589,00	386,30
	106	-60,58	1199,00	-266,40
110	106	-60,62	1199,00	-265,70
	68	-60,62	-190,20	-919,40
111	68	0,00	-2689,00	916,50
	108	0,00	-2272,00	757,80
112	108	-0,21	-2272,00	757,90
	109	-0,21	-1855,00	599,20

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
113	109	-0,34	-1855,00	599,20
	110	-0,34	-1439,00	440,50
114	110	-0,42	-1439,00	440,70
	111	-0,42	-1022,00	282,10
115	111	-0,45	-1022,00	282,10
	107	-0,45	-605,70	123,60
116	107	-0,46	-605,70	123,60
	112	-0,46	-189,10	-34,92
117	112	-0,46	-189,10	-34,92
	113	-0,46	227,50	-193,40
118	113	-0,46	227,50	-193,50
	114	-0,46	644,10	-351,90
119	114	-0,49	644,00	-351,90
	115	-0,49	1061,00	-510,30
120	115	-0,56	1061,00	-510,30
	78	-0,56	1477,00	-668,80
121	78	70,52	315,10	-670,80
	117	70,52	-1077,00	-476,20
122	117	70,58	-1077,00	-475,40
	118	70,58	-2469,00	-279,70
123	118	70,66	-2469,00	-277,90
	119	70,66	-3860,00	-81,12
124	119	70,70	-3860,00	-78,35
	120	70,70	-5251,00	119,50
125	120	70,62	-5251,00	123,20
	116	70,62	-6642,00	322,00
126	116	-70,43	-6620,00	2369,00
	121	-70,43	-4410,00	1707,00

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
127	121	-71,33	-4412,00	1704,00
	122	-71,33	-2201,00	1044,00
128	122	-71,60	-2202,00	1043,00
	123	-71,60	8,77	384,50
129	123	-71,60	8,48	384,40
	124	-71,60	2220,00	-272,00
130	124	-71,67	2220,00	-270,30
	88	-71,67	4432,00	-925,10
131	88	0,58	-1585,00	918,10
	126	0,58	-1169,00	760,10
132	126	0,47	-1169,00	760,00
	127	0,47	-752,40	601,90
133	127	0,42	-752,30	601,70
	128	0,42	-336,10	443,60
134	128	0,40	-336,10	443,50
	129	0,40	80,14	285,40
135	129	0,40	80,15	285,30
	125	0,40	496,40	127,10
136	125	0,41	496,40	127,00
	130	0,41	912,60	-31,16
137	130	0,41	912,60	-31,15
	131	0,41	1329,00	-189,40
138	131	0,38	1329,00	-189,40
	132	0,38	1745,00	-347,60
139	132	0,30	1745,00	-347,50
	133	0,30	2161,00	-505,70
140	133	0,17	2161,00	-505,70
	58	0,17	2577,00	-663,90

Barras	Nodos	M <sub>x</sub> (Nm)	M <sub>y</sub> (Nm)	M <sub>z</sub> (Nm)
141	98	-21,92	124,60	2047,00
	135	-21,92	-3475,00	1198,00
142	135	-24,46	-3475,00	1196,00
	136	-24,46	-7074,00	344,50
143	136	-25,94	-7074,00	340,60
	137	-25,94	-10670,00	-513,00
144	137	-22,57	-10670,00	-518,70
	138	-22,57	-14270,00	-1374,00
145	138	-10,55	-14270,00	-1379,00
	134	-10,55	-17860,00	-2235,00
146	134	10,56	-17860,00	-2235,00
	139	10,56	-14260,00	-1378,00
147	139	22,57	-14260,00	-1373,00
	140	22,57	-10660,00	-518,00
148	140	25,93	-10660,00	-512,20
	141	25,93	-7061,00	340,40
149	141	24,45	-7061,00	344,30
	142	24,45	-3461,00	1195,00
150	142	21,92	-3461,00	1197,00
	116	21,92	139,60	2047,00

**VALORES NUMÉRICOS DEL FACTOR DE SEGURIDAD**

Barras	FS
1	8,95
2	9,78
3	10,79
4	12,02
5	13,56
6	15,56
7	18,25
8	22,06
9	27,83
10	37,59
11	26,59
12	21,45
13	17,96
14	15,45
15	13,55
16	12,06
17	10,87
18	9,89
19	9,08
20	8,39
21	59,11
22	38,41
23	28,28
24	22,33
25	18,44
26	15,69
27	13,66
28	12,09

Barras	FS
29	10,84
30	9,83
31	9,10
32	9,92
33	10,91
34	12,11
35	13,60
36	15,51
37	18,05
38	21,56
39	26,75
40	35,15
41	5,00
42	8,90
43	9,04
44	5,05
45	3,47
46	6,40
47	13,00
48	8,98
49	5,18
50	3,62
51	7,34
52	15,78
53	7,65
54	4,82
55	3,51
56	6,25

Barras	FS
57	12,56
58	9,08
59	5,20
60	3,62
61	3,62
62	4,31
63	5,32
64	6,95
65	10,02
66	11,54
67	10,21
68	8,96
69	6,43
70	5,01
71	3,43
72	4,09
73	5,07
74	6,67
75	9,72
76	14,09
77	16,73
78	9,45
79	6,54
80	4,99
81	8,32
82	9,03
83	9,87
84	10,89

Barras	FS
85	12,14
86	13,70
87	11,51
88	9,90
89	8,68
90	7,73
91	13,03
92	16,79
93	19,37
94	15,47
95	12,87
96	11,01
97	9,62
98	8,54
99	7,68
100	6,89
101	7,91
102	13,88
103	12,90
104	7,55
105	5,27
106	5,41
107	6,76
108	8,97
109	13,22
110	14,25
111	13,85
112	16,35

Barras	FS
113	19,95
114	25,54
115	35,35
116	56,37
117	69,77
118	38,89
119	26,91
120	20,56
121	18,65
122	13,36
123	9,03
124	6,80
125	5,44
126	5,43
127	7,85
128	12,55
129	13,69
130	7,84
131	14,17
132	16,91
133	20,98
134	27,62
135	40,36
136	34,22
137	24,95
138	19,59
139	16,11
140	13,68

Barras	FS
141	6,36
142	4,84
143	3,34
144	2,54
145	2,04
146	2,04
147	2,54
148	3,34
149	4,84
150	6,35

# CÁLCULO DE FACTORES DE SEGURIDAD

**BARRAS BASE EXTERIOR: PERFILES HEB-120**

Área (cm <sup>2</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>z</sub> (cm <sup>3</sup> )	h (cm)	e (cm)	b (cm)	e <sub>1</sub> (cm)	mz=my (cm <sup>3</sup> )	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )
34,00	144,00	53,00	12,00	0,65	12,00	1,10	82,60	318	864

Barras	Nodos	σ <sub>max</sub> alas	τ <sub>max</sub> alas	σ <sub>cálculo</sub> alas	σ <sub>max</sub> alma	τ <sub>max</sub> alma	σ <sub>cálculo</sub> alma	FS mínimo
1	1	-29500311,07	-143557,66	29501358,95	-1155882,35	4300737,97	7538242,85	9,49
	3	-26967522,81	-143557,66	26968669,10	-1155882,35	4300737,97	7538242,85	10,38
2	3	-26968360,77	-142621,21	26969492,12	-1155588,24	4302185,15	7540674,74	10,38
	4	-24435572,51	-142621,21	24436821,12	-1155588,24	4302185,15	7540674,74	11,46
3	4	-24436221,79	-141872,05	24437457,28	-1155294,12	4303561,50	7542985,43	11,46
	5	-21896489,09	-141872,05	21897867,87	-1155294,12	4303561,50	7542985,43	12,79
4	5	-21904188,25	-141310,18	21905555,65	-1155294,12	4305126,75	7545664,55	12,78
	6	-19364455,54	-141310,18	19366002,28	-1155294,12	4305126,75	7545664,55	14,46
5	6	-19364727,46	-140935,60	19366265,99	-1155000,00	4305103,14	7545579,11	14,46
	7	-16831939,20	-140935,60	16833709,21	-1155000,00	4305103,14	7545579,11	16,63
6	7	-16832505,24	-140654,66	16834268,14	-1155000,00	4306219,73	7547490,32	16,63
	8	-14292527,25	-140654,66	14294603,40	-1155000,00	4306219,73	7547490,32	19,59
7	8	-14293082,19	-140467,37	14295152,74	-1154705,88	4305723,85	7546596,53	19,59
	9	-11759501,48	-140467,37	11762018,04	-1154705,88	4305723,85	7546596,53	23,81

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
8	9	-11760029,78	-140373,73	11762542,87	-1154705,88	4306769,60	7548386,51	23,80
	10	-9219070,66	-140373,73	9222276,20	-1154705,88	4306769,60	7548386,51	30,36
9	10	-9219466,89	-140373,73	9222672,28	-1154705,88	4306132,04	7547295,22	30,36
	11	-6681376,22	-140373,73	6685798,57	-1154705,88	4306132,04	7547295,22	37,10
10	11	-6682693,30	-140467,37	6687120,68	-1154705,88	4305636,15	7546446,43	37,10
	2	-4142742,05	-140467,37	4149880,11	-1154705,88	4305636,15	7546446,43	37,10
11	2	6016663,83	96360,62	6018978,30	-597352,94	4128890,67	7176353,19	39,02
	13	8436523,37	96360,62	8438174,13	-597352,94	4128890,67	7176353,19	33,18
12	13	8435738,69	96266,97	8437386,39	-597647,06	4129599,08	7177600,40	33,19
	14	10853530,09	96266,97	10854810,80	-597647,06	4129599,08	7177600,40	25,80
13	14	10853322,54	96360,62	10854605,77	-597647,06	4128010,21	7174857,97	25,80
	15	13271227,16	96360,62	13272276,61	-597647,06	4128010,21	7174857,97	21,10
14	15	13270499,08	96454,26	13271550,62	-597941,18	4127656,01	7174271,11	21,10
	16	15688762,18	96454,26	15689651,65	-597941,18	4127656,01	7174271,11	17,85
15	16	15688166,17	96547,91	15689057,41	-598235,29	4127278,19	7173643,52	17,85
	17	18106768,90	96547,91	18107541,09	-598235,29	4127278,19	7173643,52	15,46
16	17	18106078,55	96828,84	18106855,28	-598529,41	4126704,71	7172678,21	15,46
	18	20523907,70	96828,84	20524592,92	-598529,41	4126704,71	7172678,21	13,64

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
17	18	20523341,66	97297,07	20524033,54	-598529,41	4127365,88	7173819,41	13,64
	19	22940453,82	97297,07	22941072,81	-598529,41	4127365,88	7173819,41	12,21
18	19	22939782,34	97765,29	22940407,32	-598823,53	4125729,79	7171020,05	12,21
	20	25357083,18	97765,29	25357648,58	-598823,53	4125729,79	7171020,05	11,04
19	20	25356411,70	98514,45	25356985,82	-599117,65	4126910,47	7173082,46	11,04
	21	27772580,47	98514,45	27773104,63	-599117,65	4126910,47	7173082,46	10,08
20	21	27772097,67	99357,26	27772630,85	-599411,76	4126053,62	7171628,12	10,08
	12	30180755,95	99357,26	30181246,58	-599411,76	4126053,62	7171628,12	9,28
21	12	1168836,02	142152,98	1194487,36	703529,41	4314629,57	7506200,00	37,30
	23	3706493,25	142152,98	3714662,11	703529,41	4314629,57	7506200,00	37,30
22	23	3707247,97	142059,34	3715404,42	703529,41	4314535,11	7506037,13	37,30
	24	6244905,20	142059,34	6249750,67	703529,41	4314535,11	7506037,13	37,30
23	24	6244905,20	141872,05	6249737,91	703529,41	4314157,30	7505385,61	37,31
	25	8779656,25	141872,05	8783094,38	703529,41	4314157,30	7505385,61	31,88
24	25	8779550,81	141684,76	8782979,91	703235,29	4313496,12	7504217,89	31,88
	26	11318151,44	141684,76	11320811,62	703235,29	4313496,12	7504217,89	24,73
25	26	11317668,64	141497,47	11320321,91	702941,18	4313614,19	7504393,93	24,73
	27	13856307,00	141497,47	13858474,25	702941,18	4313614,19	7504393,93	20,20

Barras	Nodos	$\sigma_{\max}$ alas	$\tau_{\max}$ alas	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alas	$\sigma_{\max}$ alma	$\tau_{\max}$ alma	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alma	FS mínimo
26	27	13855722,10	141403,82	13857886,56	702941,18	4315391,96	7507459,60	20,21
	28	16401003,02	141403,82	16402831,62	702941,18	4315391,96	7507459,60	17,07
27	28	16400323,78	141216,53	16402147,61	702941,18	4315604,48	7507826,08	17,07
	29	18938433,84	141216,53	18940013,27	702941,18	4315604,48	7507826,08	14,78
28	29	18937479,34	141216,53	18939058,85	702647,06	4315769,77	7508083,59	14,78
	30	21475457,33	141216,53	21476850,19	702647,06	4315769,77	7508083,59	13,04
29	30	21474597,18	141310,18	21475991,93	702352,94	4317405,87	7510877,44	13,04
	31	24012405,35	141310,18	24013652,71	702352,94	4317405,87	7510877,44	11,66
30	31	24010741,65	141403,82	24011990,74	701764,71	4319136,41	7513806,74	11,66
	22	26548304,54	141403,82	26549434,25	701764,71	4319136,41	7513806,74	10,55
31	22	-25930538,72	-95705,10	25931068,56	1323529,41	4125325,03	7266818,42	10,80
	32	-23501671,93	-95705,10	23502256,53	1323529,41	4125325,03	7266818,42	11,91
32	32	-23502576,21	-95705,10	23503160,78	1323823,53	4124113,98	7264809,51	11,91
	33	-21080906,03	-95705,10	21081557,76	1323823,53	4124113,98	7264809,51	13,28
33	33	-21081773,95	-95798,75	21082426,93	1323823,53	4121432,14	7260242,23	13,28
	34	-18667304,35	-95798,75	18668041,78	1323823,53	4121432,14	7260242,23	15,00
34	34	-18667934,76	-95986,04	18668675,05	1324117,65	4120291,93	7258354,10	15,00
	35	-16246841,47	-95986,04	16247692,08	1324117,65	4120291,93	7258354,10	17,23

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
35	35	-16247245,47	-96266,97	16248101,04	1324411,76	4120622,52	7258970,75	17,23
	36	-13826510,67	-96266,97	13827516,02	1324411,76	4120622,52	7258970,75	20,25
36	36	-13827076,70	-96547,91	13828087,89	1324411,76	4119411,47	7256908,37	20,25
	37	-11413512,76	-96547,91	11414737,76	1324411,76	4119411,47	7256908,37	24,53
37	37	-11413701,44	-96828,84	11414933,56	1324411,76	4117893,44	7254323,24	24,53
	38	-8993193,06	-96828,84	8994756,74	1324411,76	4117893,44	7254323,24	31,13
38	38	-8993464,98	-97109,78	8995037,70	1324705,88	4117917,06	7254417,16	31,13
	39	-6579901,04	-97109,78	6582050,48	1324705,88	4117917,06	7254417,16	38,60
39	39	-6580089,72	-97390,71	6582251,55	1324705,88	4116257,35	7251590,82	38,61
	40	-4161475,98	-97390,71	4164893,42	1324705,88	4116257,35	7251590,82	38,61
40	40	-4161664,66	-97578,00	4165095,10	1324705,88	4115997,60	7251148,49	38,61
	1	-1744756,91	-97578,00	1752923,58	1324705,88	4115997,60	7251148,49	38,61

**BARRAS BASE INTERIOR: PERFILES HEB-120**

Área (cm <sup>2</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>z</sub> (cm <sup>3</sup> )	h (cm)	e (cm)	b (cm)	e <sub>1</sub> (cm)	mz=my (cm <sup>3</sup> )	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )
34,00	144,00	53,00	12,00	0,65	12,00	1,10	82,60	318	864

Barras	Nodos	σ <sub>max</sub> alas	τ <sub>max</sub> alas	σ <sub>cálculo</sub> alas	σ <sub>max</sub> alma	τ <sub>max</sub> alma	σ <sub>cálculo</sub> alma	FS mínimo
41	2	-44491181,34	-135504,19	44491800,38	3100000,00	29655987,59	51459137,19	5,44
	42	-20808278,83	-135504,19	20809602,40	3100000,00	29655987,59	51459137,19	5,44
42	42	-20806865,95	-136815,22	20808215,35	3102941,18	29639933,65	51431558,83	5,44
	43	2875443,74	-136815,22	2885191,84	3102941,18	29639933,65	51431558,83	5,44
43	43	2875341,44	-138219,90	2885290,73	3102941,18	29638989,11	51429925,82	5,44
	44	26557107,84	-138219,90	26558186,90	3102941,18	29638989,11	51429925,82	5,44
44	44	2655600,63	-138313,54	26556681,21	3100000,00	29652587,25	51453258,32	5,44
	45	50243088,05	-138313,54	50243659,19	3100000,00	29652587,25	51453258,32	5,44
45	45	50243278,95	-139811,86	50243862,53	3097058,82	29651453,80	51451121,58	5,44
	41	73967035,76	-139811,86	73967432,17	3097058,82	29651453,80	51451121,58	3,79
46	12	-38012799,79	718256,50	38033151,66	208500,00	27789437,82	48133169,80	5,82
	46	-16452836,48	718256,50	16499803,19	208500,00	27789437,82	48133169,80	5,82
47	46	-16445852,57	716570,89	16492619,21	209823,53	27794160,51	48141355,42	5,82
	47	5103389,36	716570,89	5252142,85	209823,53	27794160,51	48141355,42	5,82

Barras	Nodos	$\sigma_{\max}$ alas	$\tau_{\max}$ alas	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alas	$\sigma_{\max}$ alma	$\tau_{\max}$ alma	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alma	FS mínimo
48	47	5101607,00	716383,60	5250334,32	209441,18	27799119,35	48149942,63	5,82
	48	26645803,86	716383,60	26674678,62	209441,18	27799119,35	48149942,63	5,82
49	48	26635732,27	714791,64	26664489,78	207294,12	27803842,05	48158113,22	5,81
	49	48169317,18	714791,64	48185224,90	207294,12	27803842,05	48158113,22	5,81
50	49	48151053,58	709266,59	48166722,31	203558,82	27808092,48	48165459,18	5,81
	41	69678789,43	709266,59	69689618,12	203558,82	27808092,48	48165459,18	4,02
51	22	28722378,96	-89646,28	28722798,66	-2688235,29	-25552007,71	44338943,41	6,31
	50	8282810,62	-89646,28	8284265,88	-2688235,29	-25552007,71	44338943,41	6,31
52	50	8283568,66	-90245,61	8285043,31	-2687647,06	-25565889,21	44362907,03	6,31
	51	-12157118,55	-90245,61	12158123,38	-2687647,06	-25565889,21	44362907,03	6,31
53	51	-12158174,71	-91200,78	12159200,84	-2688235,29	-25550149,32	44335730,52	6,32
	52	-32600265,69	-91200,78	32600648,40	-2688235,29	-25550149,32	44335730,52	6,32
54	52	-32603607,53	-91331,89	32603991,30	-2690294,12	-25549733,73	44335136,89	6,32
	53	-53039318,23	-91331,89	53039554,13	-2690294,12	-25549733,73	44335136,89	5,28
55	53	-53044847,64	-91331,89	53045083,52	-2693823,53	-25534600,71	44309188,49	5,28
	41	-73446421,01	-91331,89	73446591,37	-2693823,53	-25534600,71	44309188,49	3,81
56	1	41273205,45	-487234,50	41281832,33	209500,00	-27316596,78	47314197,34	5,92
	54	18565364,78	-487234,50	18584535,55	209500,00	-27316596,78	47314197,34	5,92

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
57	54	18577305,89	-487234,50	18596464,36	210911,76	-27313290,89	47308477,70	5,92
	55	-4135121,57	-487234,50	4220358,13	210911,76	-27313290,89	47308477,70	5,92
58	55	-4136470,74	-486485,34	4221420,86	210558,82	-27309748,87	47302341,22	5,92
	56	-26846500,92	-486485,34	26859721,07	210558,82	-27309748,87	47302341,22	5,92
59	56	-26854249,54	-485923,47	26867435,36	208470,59	-27306442,98	47296606,06	5,92
	57	-49575675,11	-485923,47	49582818,88	208470,59	-27306442,98	47296606,06	5,65
60	57	-49589498,64	-481053,93	49596498,01	204647,06	-27303137,09	47290863,45	5,65
	41	-72308508,08	-481053,93	72313308,45	204647,06	-27303137,09	47290863,45	3,87

**BARRAS PILARES: PERFILES HEB-120**

Área (cm <sup>2</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>z</sub> (cm <sup>3</sup> )	h (cm)	e (cm)	b (cm)	e <sub>1</sub> (cm)	mz=my (cm <sup>3</sup> )	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )
34,00	144,00	53,00	12,00	0,65	12,00	1,10	82,60	318	864

Barras	Nodos	σ <sub>max</sub> alas	τ <sub>max</sub> alas	σ <sub>cálculo</sub> alas	σ <sub>max</sub> alma	τ <sub>max</sub> alma	σ <sub>cálculo</sub> alma	FS mínimo
61	1	-63470653,98	-178674,50	63471408,45	4391176,47	-17200308,28	30113688,67	4,41
	59	-54876171,54	-178674,50	54877044,17	4391176,47	-17200308,28	30113688,67	5,10
62	59	-54876171,54	-162567,57	54876893,93	4391176,47	-17181417,48	30081318,97	5,10
	60	-46300765,35	-162567,57	46301621,54	4391176,47	-17181417,48	30081318,97	6,05
63	60	-46297129,73	-138688,12	46297752,91	4394117,65	-17166358,84	30055946,11	6,05
	61	-37742674,81	-138688,12	37743439,23	4394117,65	-17166358,84	30055946,11	7,42
64	61	-37742674,81	-112748,48	37743180,02	4394117,65	-17156022,89	30038236,19	7,42
	62	-29208476,69	-112748,48	29209129,52	4394117,65	-17156022,89	30038236,19	9,32
65	62	-29201532,25	-90554,63	29201953,46	4394117,65	-17151880,43	30031138,46	9,32
	63	-20656013,38	-90554,63	20656608,85	4394117,65	-17151880,43	30031138,46	9,32
66	63	-20656013,38	-77781,47	20656452,71	4394117,65	-17152460,68	30032132,66	9,32
	64	-12128759,71	-77781,47	12129507,90	4394117,65	-17152460,68	30032132,66	9,32
67	64	-12128759,71	-80113,23	12129553,43	4394117,65	-17156873,07	30039692,92	9,32
	65	-3594561,60	-80113,23	3597238,87	4394117,65	-17156873,07	30039692,92	9,32

Barras	Nodos	$\sigma_{\max}$ alas	$\tau_{\max}$ alas	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alas	$\sigma_{\max}$ alma	$\tau_{\max}$ alma	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alma	FS mínimo
68	65	-3594561,60	-103383,99	3599019,01	4394117,65	-17163646,82	30051299,24	9,32
	66	4940239,24	-103383,99	4943483,44	4394117,65	-17163646,82	30051299,24	9,32
69	66	4937298,06	-153390,37	4944441,12	4391176,47	-17178975,40	30077134,48	9,31
	67	13457607,29	-153390,37	13460229,56	4391176,47	-17178975,40	30077134,48	9,31
70	67	13457607,29	-235797,90	13463803,17	4391176,47	-17196665,34	30107446,38	9,30
	58	22015652,36	-235797,90	22019440,29	4391176,47	-17196665,34	30107446,38	9,30
71	2	-40414191,02	610190,27	40428008,02	2380882,35	-18040328,03	31337340,46	6,93
	69	-31030936,31	610190,27	31048929,20	2380882,35	-18040328,03	31337340,46	8,94
72	69	-31029759,83	465977,10	31040254,50	2382058,82	-18024999,44	31310956,85	8,94
	70	-21646505,12	465977,10	21661546,29	2382058,82	-18024999,44	31310956,85	8,94
73	70	-21645328,65	362967,69	21654456,56	2383235,29	-18012612,45	31289653,76	8,95
	71	-12280941,85	362967,69	12297022,79	2383235,29	-18012612,45	31289653,76	8,95
74	71	-12280059,50	295075,13	12290690,35	2384117,65	-18002586,81	31272406,56	8,95
	72	-2908728,26	295075,13	2953287,68	2384117,65	-18002586,81	31272406,56	8,95
75	72	-2927007,95	256118,84	2960433,44	2384705,88	-17996393,31	31261755,21	8,96
	73	6446210,08	256118,84	6461456,10	2384705,88	-17996393,31	31261755,21	8,96
76	73	6439559,75	239918,27	6452953,75	2385000,00	-17991090,37	31252619,45	8,96
	74	15802023,06	239918,27	15807486,05	2385000,00	-17991090,37	31252619,45	8,96

Barras	Nodos	$\sigma_{\max}$ alas	$\tau_{\max}$ alas	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alas	$\sigma_{\max}$ alma	$\tau_{\max}$ alma	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alma	FS mínimo
77	74	15801373,78	240386,50	15806858,33	2385294,12	-17989619,57	31250101,84	8,96
	75	25170592,86	240386,50	25174036,27	2385294,12	-17989619,57	31250101,84	8,96
78	75	25170298,74	251249,31	25174060,41	2385000,00	-17990510,12	31251617,37	8,96
	76	34539743,19	251249,31	34542484,54	2385000,00	-17990510,12	31251617,37	8,11
79	76	34539449,07	266419,78	34542531,47	2384705,88	-17993762,02	31257210,96	8,11
	77	43914252,53	266419,78	43916676,94	2384705,88	-17993762,02	31257210,96	6,38
80	77	43913664,29	279904,65	43916340,37	2384117,65	-18000846,07	31269400,29	6,38
	68	53288467,75	279904,65	53290673,06	2384117,65	-18000846,07	31269400,29	5,25
81	12	23733453,57	110126,42	23734220,06	4432352,94	-8175384,98	14837672,03	11,80
	79	24926666,36	110126,42	24927396,16	4432352,94	-8175384,98	14837672,03	11,23
82	79	24919721,91	102166,60	24920350,20	4432352,94	-8169501,79	14827947,64	11,24
	80	26114425,27	102166,60	26115024,82	4432352,94	-8169501,79	14827947,64	10,72
83	80	26113066,78	101792,02	26113661,97	4432352,94	-8165089,40	14820654,75	10,72
	81	27308034,28	101792,02	27308603,43	4432352,94	-8165089,40	14820654,75	10,25
84	81	27308034,28	107504,36	27308669,10	4432352,94	-8163038,35	14817264,87	10,25
	82	28510078,31	107504,36	28510686,36	4432352,94	-8163038,35	14817264,87	9,82
85	82	28508191,52	117898,95	28508922,88	4432352,94	-8160987,31	14813875,06	9,82
	83	29714009,13	117898,95	29714710,81	4432352,94	-8160987,31	14813875,06	9,42

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
86	83	29714009,13	131196,53	29714878,02	4432352,94	-8160407,06	14812916,09	9,42
	84	30921713,53	131196,53	30922548,49	4432352,94	-8160407,06	14812916,09	9,05
87	84	30921713,53	145992,42	30922747,43	4432352,94	-8166020,31	14822193,36	9,05
	85	32135078,31	145992,42	32136073,18	4432352,94	-8166020,31	14822193,36	8,71
88	85	32135078,31	160788,32	32136285,05	4432352,94	-8167801,42	14825137,19	8,71
	86	33366708,29	160788,32	33367870,48	4432352,94	-8167801,42	14825137,19	8,39
89	86	33366708,29	173898,61	33368067,73	4432352,94	-8175776,02	14838318,40	8,39
	87	34589009,13	173898,61	34590320,53	4432352,94	-8175776,02	14838318,40	8,09
90	87	34589009,13	184012,26	34590477,50	4432352,94	-8183750,62	14851500,77	8,09
	78	35833650,11	184012,26	35835067,49	4432352,94	-8183750,62	14851500,77	7,81
91	22	-3571631,83	-290861,11	3606986,90	6444117,65	-10691574,26	19607547,85	14,28
	89	-2518216,34	-290861,11	2568114,89	6444117,65	-10691574,26	19607547,85	14,28
92	89	-2518327,45	-290861,11	2568223,84	6444117,65	-10686851,56	19599822,47	14,29
	90	-1468421,66	-290861,11	1552437,67	6444117,65	-10686851,56	19599822,47	14,29
93	90	-1469116,11	-289550,08	1552359,45	6444117,65	-10684490,21	19595959,92	14,29
	91	-423763,90	-289550,08	656577,18	6444117,65	-10684490,21	19595959,92	14,29
94	91	-424235,60	-289550,08	656881,72	6444117,65	-10687431,80	19600771,62	14,29
	92	620689,97	-289550,08	797981,07	6444117,65	-10687431,80	19600771,62	14,29

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
95	92	618803,18	-293389,52	800718,18	6444117,65	-10691844,20	19607989,43	14,28
	93	1659343,01	-293389,52	1735411,04	6444117,65	-10691844,20	19607989,43	14,28
96	93	1657456,22	-303690,46	1738920,59	6444117,65	-10700979,29	19622933,66	14,27
	94	2701769,64	-303690,46	2752497,57	6444117,65	-10700979,29	19622933,66	14,27
97	94	2699882,85	-323074,96	2757263,08	6444117,65	-10713946,53	19644149,33	14,25
	95	3749856,64	-323074,96	3791379,32	6444117,65	-10713946,53	19644149,33	14,25
98	95	3747969,85	-354071,43	3797812,23	6444117,65	-10729275,12	19669231,96	14,24
	96	4798546,37	-354071,43	4837576,56	6444117,65	-10729275,12	19669231,96	14,24
99	96	4798546,37	-399489,21	4848177,20	6444117,65	-10746074,50	19696725,72	14,22
	97	5851612,41	-399489,21	5892380,05	6444117,65	-10746074,50	19696725,72	14,22
100	97	5848671,23	-461856,72	5903125,45	6441176,47	-10769067,39	19733402,93	14,19
	88	6920605,19	-461856,72	6966685,81	6441176,47	-10769067,39	19733402,93	14,19

**BARRAS PLATAFORMA EXTERIOR: PERFILES HEB-120**

Área (cm <sup>2</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>z</sub> (cm <sup>3</sup> )	h (cm)	e (cm)	b (cm)	e <sub>1</sub> (cm)	mz=my (cm <sup>3</sup> )	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )
34,00	144,00	53,00	12,00	0,65	12,00	1,10	82,60	318	864

Barras	Nodos	σ <sub>max</sub> alas	τ <sub>max</sub> alas	σ <sub>cálculo</sub> alas	σ <sub>max</sub> alma	τ <sub>max</sub> alma	σ <sub>cálculo</sub> alma	FS mínimo
101	58	-40973237,76	5778827,74	42178083,91	1430588,24	23253821,57	40302198,90	6,64
	99	-21987074,24	5778827,74	24158145,28	1430588,24	23253821,57	40302198,90	6,95
102	99	-21964834,44	5790065,13	24145983,41	1431470,59	23284519,11	40355366,42	6,94
	100	-3008859,60	5790065,13	10470329,44	1431470,59	23284519,11	40355366,42	6,94
103	100	-3010542,61	5789128,68	10469259,73	1431176,47	23312855,31	40404404,88	6,93
	101	15919462,63	5789128,68	18814125,63	1431176,47	23312855,31	40404404,88	6,93
104	101	15890761,19	5787255,78	18788115,38	1430588,24	23341191,50	40453433,04	6,92
	102	34784319,89	5787255,78	36199805,23	1430588,24	23341191,50	40453433,04	6,92
105	102	34736292,08	5791938,02	36155907,21	1428823,53	23371889,04	40506507,24	6,91
	98	53609248,06	5791938,02	54539812,21	1428823,53	23371889,04	40506507,24	5,13
106	98	90290936,00	-5831268,89	90854081,99	-648529,41	-4259838,89	7406704,57	3,08
	103	68367062,83	-5831268,89	69109090,36	-648529,41	-4259838,89	7406704,57	4,05
107	103	68437648,91	-5730132,38	69153561,29	-646470,59	-4240948,10	7373930,20	4,05
	104	46501852,26	-5730132,38	47549190,48	-646470,59	-4240948,10	7373930,20	5,89

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
108	104	46533820,14	-5684246,37	47563939,99	-645294,12	-4204987,98	7311783,38	5,89
	105	24592363,12	-5684246,37	26489928,16	-645294,12	-4204987,98	7311783,38	10,57
109	105	24623434,15	-5673008,98	26511556,01	-644411,76	-4186097,18	7279113,64	10,56
	106	2655562,03	-5673008,98	10178462,67	-644411,76	-4186097,18	7279113,64	27,51
110	106	2669063,69	-5676754,78	10188254,78	-644117,65	-4169567,74	7250570,52	27,48
	68	-19312120,79	-5676754,78	21671055,44	-644117,65	-4169567,74	7250570,52	12,92
111	68	-1377146,52	-260,05	1377146,59	4011,76	8226842,72	14249310,14	19,65
	108	-1475652,81	-260,05	1475652,87	4011,76	8226842,72	14249310,14	19,65
112	108	-1473527,78	-19478,14	1473913,94	4250,00	8226842,72	14249310,21	19,65
	109	-1572034,07	-19478,14	1572396,04	4250,00	8226842,72	14249310,21	19,65
113	109	-1571878,18	-31904,82	1572849,26	4405,88	8226842,72	14249310,26	19,65
	110	-1677328,92	-31904,82	1678238,97	4405,88	8226842,72	14249310,26	19,65
114	110	-1673328,86	-38993,74	1674691,32	4632,35	8224481,37	14245220,35	19,66
	111	-1769948,36	-38993,74	1771236,50	4632,35	8224481,37	14245220,35	19,66
115	111	-1769786,60	-42215,13	1771296,40	4794,12	8224481,37	14245220,41	19,66
	107	-1869380,41	-42215,13	1870809,84	4794,12	8224481,37	14245220,41	19,66
116	107	-1869071,59	-43057,93	1870558,89	5102,94	8224481,37	14245220,51	19,66
	112	-1966959,43	-43057,93	1968372,77	5102,94	8224481,37	14245220,51	19,66

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
117	112	-1966903,55	-42983,02	1968312,01	5158,82	8224481,37	14245220,53	19,66
	113	-2064036,67	-42983,02	2065378,90	5158,82	8224481,37	14245220,53	19,66
118	113	-2065949,93	-43479,33	2067322,06	5132,35	8224481,37	14245220,52	19,66
	114	-2161573,62	-43479,33	2162885,08	5132,35	8224481,37	14245220,52	19,66
119	114	-2162394,54	-46007,75	2163862,35	5005,88	8222120,02	14241130,50	19,66
	115	-2255240,45	-46007,75	2256647,87	5005,88	8222120,02	14241130,50	19,66
120	115	-2255290,45	-52038,48	2257090,83	4955,88	8224481,37	14245220,46	19,66
	78	-2356967,60	-52038,48	2358690,37	4955,88	8224481,37	14245220,46	19,66
121	78	-11722526,98	6603839,44	16378330,95	-1254117,65	-20891362,19	36206627,21	7,73
	117	-17718189,97	6603839,44	21089484,16	-1254117,65	-20891362,19	36206627,21	7,73
122	117	-17703389,75	6609458,14	21082334,29	-1254411,76	-20912614,34	36243425,12	7,73
	118	-23677603,59	6609458,14	26299880,65	-1254411,76	-20912614,34	36243425,12	7,73
123	118	-23644229,56	6616949,73	26275495,48	-1255000,00	-20919158,51	36254773,52	7,72
	119	-29591121,59	6616949,73	31733051,36	-1255000,00	-20919158,51	36254773,52	7,72
124	119	-29539739,80	6620695,53	31687490,51	-1255882,35	-20938049,30	36287504,27	7,72
	120	-35466443,15	6620695,53	37274246,03	-1255882,35	-20938049,30	36287504,27	7,51
125	120	-35397808,30	6613203,93	37204949,01	-1257058,82	-20959301,44	36324332,73	7,53
	116	-41306587,13	6613203,93	42865341,93	-1257058,82	-20959301,44	36324332,73	6,53

Barras	Nodos	$\sigma_{\max \text{ alas}}$	$\tau_{\max \text{ alas}}$	$\sigma_{\text{cálculo alas}}$	$\sigma_{\max \text{ alma}}$	$\tau_{\max \text{ alma}}$	$\sigma_{\text{cálculo alma}}$	FS mínimo
126	116	-448520,78	-6595411,40	11432389,32	825588,24	40107851,59	69473742,34	4,03
	121	2408135,41	-6595411,40	11674650,77	825588,24	40107851,59	69473742,34	4,03
127	121	2339701,57	-6679691,82	11803772,79	827647,06	40074792,70	69416511,22	4,03
	122	5241038,04	-6679691,82	12701312,07	827647,06	40074792,70	69416511,22	4,03
128	122	5216402,15	-6704975,95	12731102,03	828823,53	40041733,81	69359269,66	4,04
	123	8144457,18	-6704975,95	14184579,31	828823,53	40041733,81	69359269,66	4,04
129	123	8140864,50	-6704975,95	14182516,78	829117,65	40023382,90	69327490,74	4,04
	124	11113708,84	-6704975,95	16074347,01	829117,65	40023382,90	69327490,74	4,04
130	124	11144901,96	-6711531,09	16104123,34	828235,29	39992685,36	69274314,29	4,04
	88	14151296,09	-6711531,09	18313741,56	828235,29	39992685,36	69274314,29	4,04
131	88	5298932,36	54061,21	5299759,62	-1016764,71	8210623,58	14257518,34	19,64
	126	5206689,17	54061,21	5207531,08	-1016764,71	8210623,58	14257518,34	19,64
132	126	5204802,38	44153,58	5205364,20	-1016764,71	8212984,93	14261597,91	19,63
	127	5114839,07	44153,58	5115410,77	-1016764,71	8212984,93	14261597,91	19,63
133	127	5111759,93	39096,75	5112208,45	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63
	128	5019018,84	39096,75	5019475,65	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63
134	128	5017132,04	37448,60	5017551,31	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63
	129	4924668,73	37448,60	4925095,87	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63

Barras	Nodos	$\sigma_{\max}$ alas	$\tau_{\max}$ alas	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alas	$\sigma_{\max}$ alma	$\tau_{\max}$ alma	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alma	FS mínimo
135	129	4922851,38	37720,17	4923284,90	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63
	125	4828570,72	37720,17	4829012,70	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63
136	125	4826683,93	38431,87	4827142,92	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63
	130	4732810,77	38431,87	4733278,86	-1016764,71	8214455,73	14264138,92	19,63
137	130	4732705,33	38113,48	4733165,71	-1017058,82	8215346,28	14265698,44	19,63
	131	4638522,94	38113,48	4638992,67	-1017058,82	8215346,28	14265698,44	19,63
138	131	4638522,94	35304,13	4638925,97	-1017058,82	8215346,28	14265698,44	19,63
	132	4542506,17	35304,13	4542917,72	-1017058,82	8215346,28	14265698,44	19,63
139	132	4544098,84	28533,61	4544367,59	-1017352,94	8215346,28	14265719,42	19,63
	133	4448082,07	28533,61	4448356,62	-1017352,94	8215346,28	14265719,42	19,63
140	133	4447787,95	16312,94	4447877,70	-1017647,06	8213875,48	14263199,39	19,63
	58	4351771,18	16312,94	4351862,90	-1017647,06	8213875,48	14263199,39	19,63

**BARRAS PLATAFORMA INTERIOR: PERFILES UPN-120**

Área (cm <sup>2</sup> )	W <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	W <sub>z</sub> (cm <sup>3</sup> )	h (cm)	e (cm)	b (cm)	e <sub>1</sub> (cm)	m <sub>z</sub> =m <sub>y</sub> (cm <sup>3</sup> )	I <sub>z</sub> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>y</sub> (cm <sup>4</sup> )
34,00	121,40	22,20	24,00	1,40	11,00	1,80	72,60	86,40	728,00

Barras	Nodos	σ <sub>max</sub> alas	τ <sub>max</sub> alas	σ <sub>cálculo</sub> alas	σ <sub>max</sub> alma	τ <sub>max</sub> alma	σ <sub>cálculo</sub> alma	FS mínimo
141	98	91185036,94	-609641,53	91191150,61	-2048529,41	11660338,17	20299924,43	3,07
	135	23291052,34	-609641,53	23314976,04	-2048529,41	11660338,17	20299924,43	12,01
142	135	23200079,90	-680284,30	23229982,08	-2049411,76	11763038,79	20476995,22	12,05
	136	-44801574,97	-680284,30	44817066,83	-2049411,76	11763038,79	20476995,22	6,25
143	136	-44981956,52	-721446,23	44999309,62	-2054117,65	11854189,80	20634554,68	6,22
	137	-113053494,29	-721446,23	113060399,90	-2054117,65	11854189,80	20634554,68	2,48
144	137	-113318486,34	-627719,41	113323702,03	-2062352,94	11921999,77	20752241,68	2,47
	138	-181499549,61	-627719,41	181502806,05	-2062352,94	11921999,77	20752241,68	1,54
145	138	-181737127,78	-293417,80	181737838,37	-2074705,88	11947795,84	20797929,72	1,54
	134	-249867350,26	-293417,80	249867867,09	-2074705,88	11947795,84	20797929,72	1,14
146	134	-245706467,90	293695,92	245706994,49	2086176,47	-11958861,77	20818147,29	1,14
	139	-177448828,06	293695,92	177449557,20	2086176,47	-11958861,77	20818147,29	1,58
147	139	-177211249,89	627719,41	177214585,13	2098529,41	-11886625,43	20694912,86	1,58
	140	-109043700,13	627719,41	109049120,28	2098529,41	-11886625,43	20694912,86	2,57

Barras	Nodos	$\sigma_{\max}$ alas	$\tau_{\max}$ alas	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alas	$\sigma_{\max}$ alma	$\tau_{\max}$ alma	$\sigma_{\text{cálculo}}$ alma	FS mínimo
148	140	-108773909,46	721168,11	108781081,21	2107058,82	-11797929,45	20542957,78	2,57
	141	-40722705,04	721168,11	40741857,55	2107058,82	-11797929,45	20542957,78	6,87
149	141	-40542323,48	680006,18	40559428,23	2111764,71	-11727906,30	20422803,64	6,90
	142	27431532,58	680006,18	27456806,17	2111764,71	-11727906,30	20422803,64	10,20
150	142	27522505,02	609641,53	27542753,51	2112647,06	-11685892,41	20350516,50	10,17
	116	95469771,89	609641,53	95475611,20	2112647,06	-11685892,41	20350516,50	2,93

# COMPARATIVA ENTRE FACTORES DE SEGURIDAD

**BASE EXTERIOR HEB-120**

Barra	FS (FLAC 3D)	FS Calculado
1	8,95	9,49
2	9,78	10,38
3	10,79	11,46
4	12,02	12,78
5	13,56	14,46
6	15,56	16,63
7	18,25	19,59
8	22,06	23,80
9	27,83	30,36
10	37,59	37,10
11	26,59	33,18
12	21,45	25,80
13	17,96	21,10
14	15,45	17,85
15	13,55	15,46
16	12,06	13,64
17	10,87	12,21
18	9,89	11,04
19	9,08	10,08
20	8,39	9,28
21	59,11	37,30
22	38,41	37,30
23	28,28	31,88
24	22,33	24,73
25	18,44	20,20
26	15,69	17,07
27	13,66	14,78
28	12,09	13,04
29	10,84	11,66
30	9,83	10,55

**BASE INTERIOR HEB-120**

Barra	FS (FLAC 3D)	FS Calculado
31	9,10	10,80
32	9,92	11,91
33	10,91	13,28
34	12,11	15,00
35	13,60	17,23
36	15,51	20,25
37	18,05	24,53
38	21,56	31,13
39	26,75	38,61
40	35,15	38,61
41	5,00	5,44
42	8,90	5,44
43	9,04	5,44
44	5,05	5,44
45	3,47	3,79
46	6,40	5,82
47	13,00	5,82
48	8,98	5,82
49	5,18	5,81
50	3,62	4,02
51	7,34	6,31
52	15,78	6,31
53	7,65	6,32
54	4,82	5,28
55	3,51	3,81
56	6,25	5,92
57	12,56	5,92
58	9,08	5,92
59	5,20	5,65
60	3,62	3,87

**PILARES HEB-120**

Barra	FS (FLAC 3D)	FS Calculado
61	3,62	4,41
62	4,31	5,10
63	5,32	6,05
64	6,95	7,42
65	10,02	9,32
66	11,54	9,32
67	10,21	9,32
68	8,96	9,32
69	6,43	9,31
70	5,01	9,30
71	3,43	6,93
72	4,09	8,94
73	5,07	8,95
74	6,67	8,95
75	9,72	8,96
76	14,09	8,96
77	16,73	8,96
78	9,45	8,11
79	6,54	6,38
80	4,99	5,25
81	8,32	11,23
82	9,03	10,72
83	9,87	10,25
84	10,89	9,82
85	12,14	9,42
86	13,70	9,05
87	11,51	8,71
88	9,90	8,39
89	8,68	8,09
90	7,73	7,81

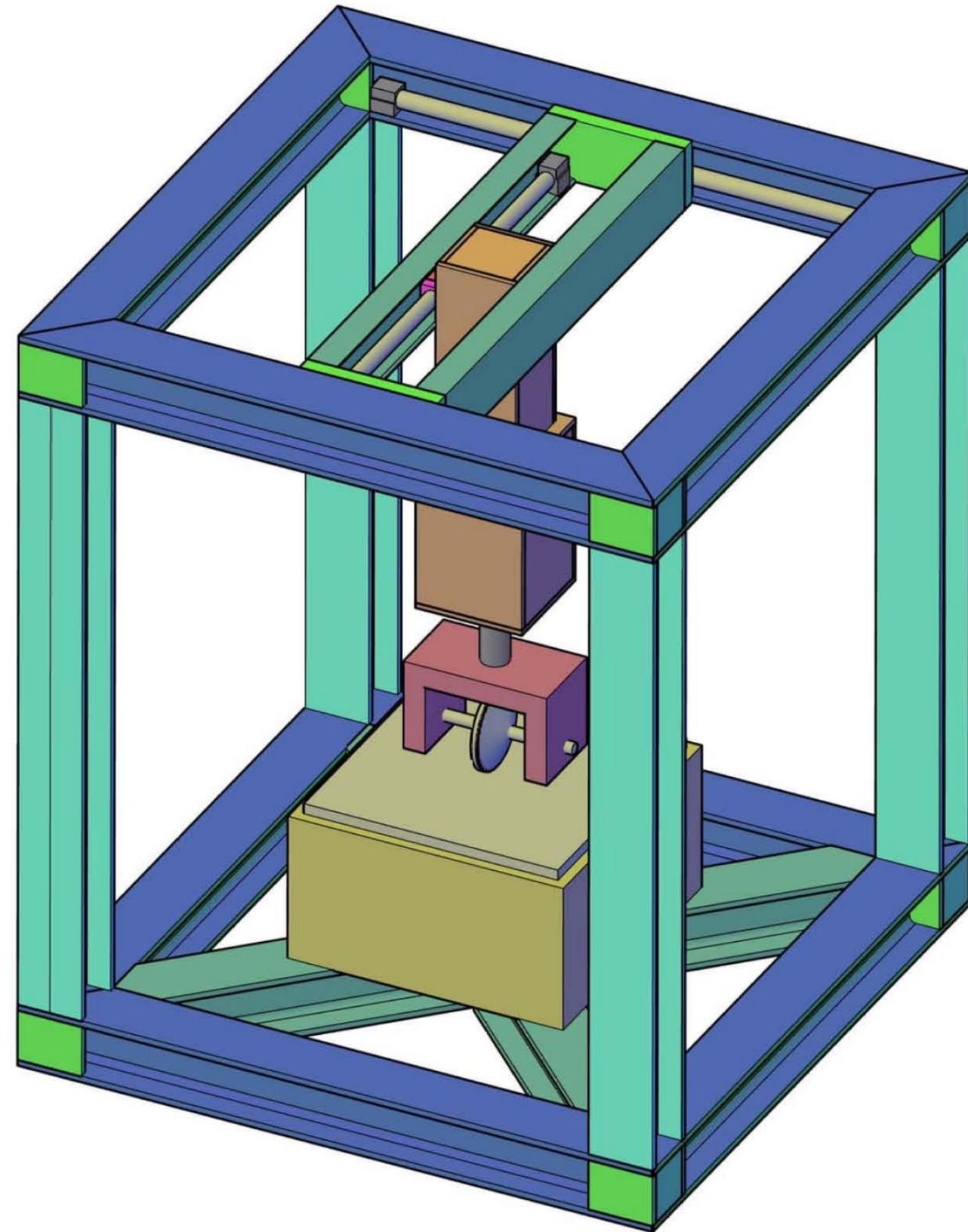
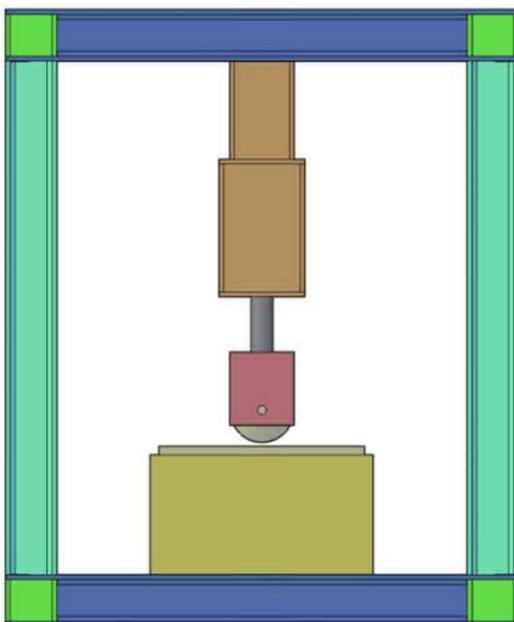
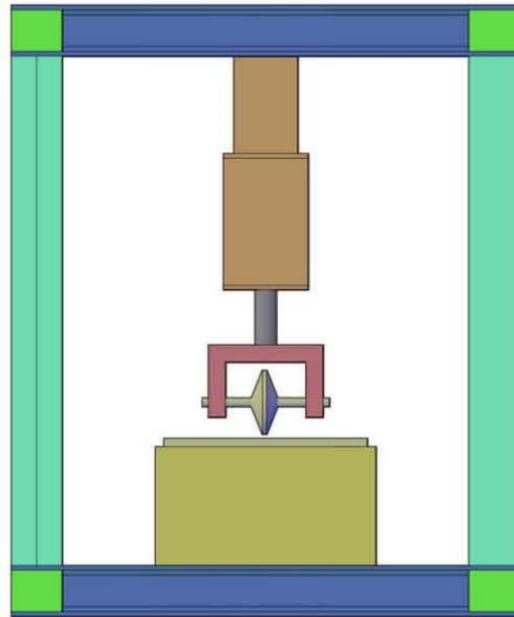
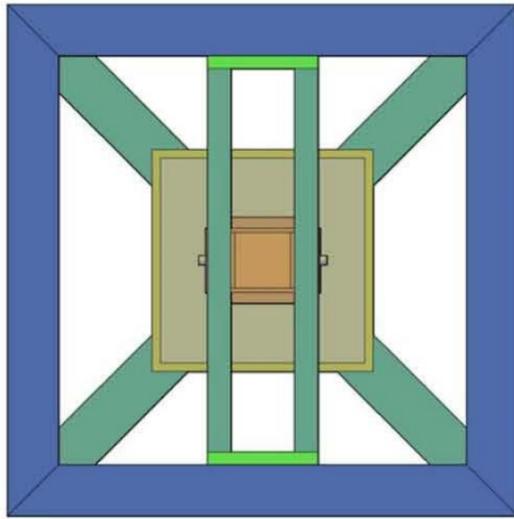
**PLATAFORMA EXTERIOR HEB-120**

Barra	FS (FLAC 3D)	FS Calculado
91	13,03	14,28
92	16,79	14,29
93	19,37	14,29
94	15,47	14,29
95	12,87	14,28
96	11,01	14,27
97	9,62	14,25
98	8,54	14,24
99	7,68	14,22
100	6,89	14,19
101	7,91	6,64
102	13,88	6,94
103	12,90	6,93
104	7,55	6,92
105	5,27	5,13
106	5,41	3,08
107	6,76	4,05
108	8,97	5,89
109	13,22	10,56
110	14,25	12,92
111	13,85	19,65
112	16,35	19,65
113	19,95	19,65
114	25,54	19,66
115	35,35	19,66
116	56,37	19,66
117	69,77	19,66
118	38,89	19,66
119	26,91	19,66
120	20,56	19,66

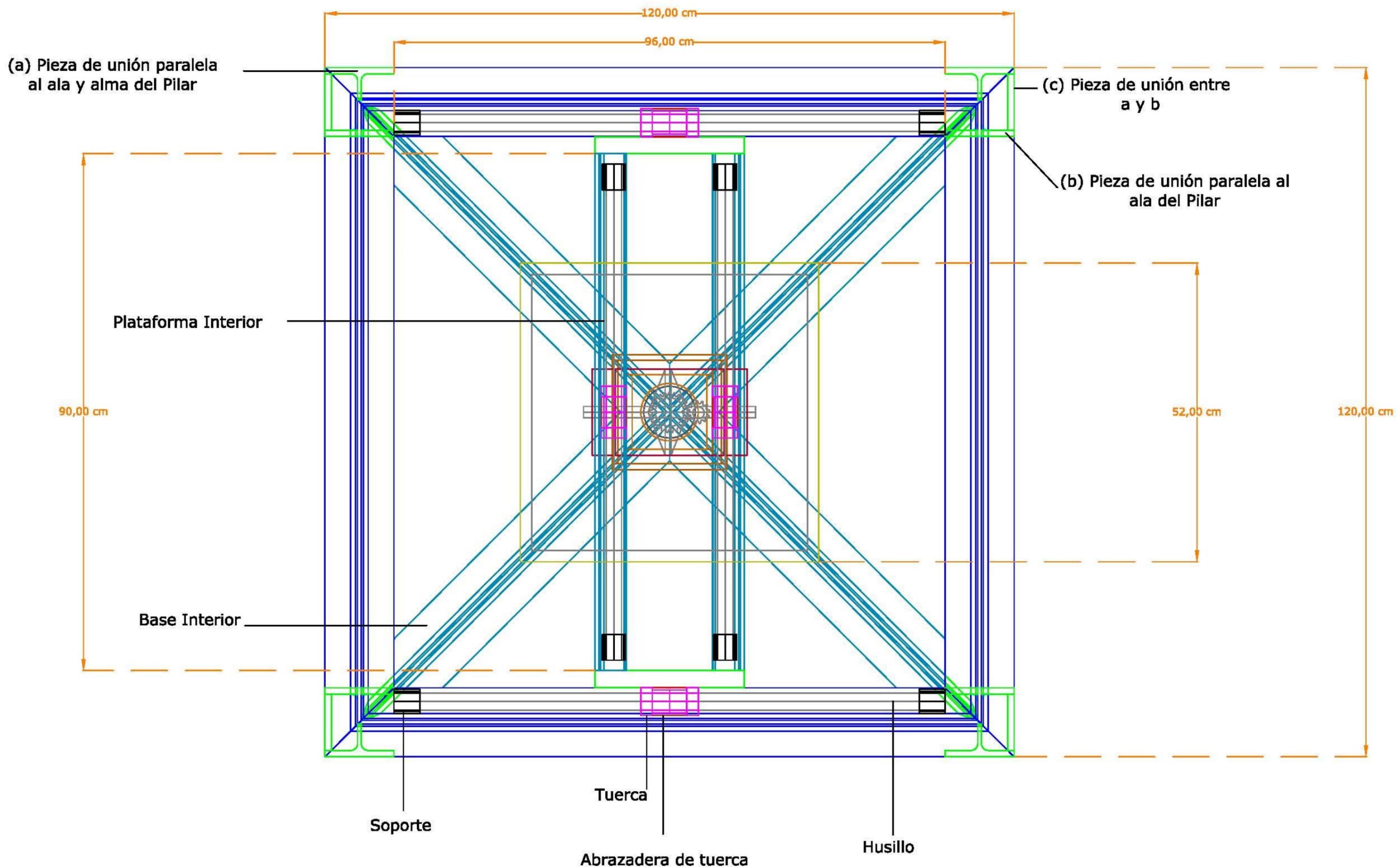
**PLATAFORMA INTERIOR 2 x UPN-120**

Barra	FS (FLAC 3D)	FS Calculado
121	18,65	7,73
122	13,36	7,73
123	9,03	7,72
124	6,80	7,51
125	5,44	6,53
126	5,43	4,03
127	7,85	4,04
128	12,55	4,04
129	13,69	4,04
130	7,84	19,64
131	14,17	19,63
132	16,91	19,63
133	20,98	19,63
134	27,62	19,63
135	40,36	19,63
136	34,22	19,63
137	24,95	19,63
138	19,59	19,63
139	16,11	19,63
140	13,68	3,07
141	6,36	6,25
142	4,84	2,48
143	3,34	1,54
144	2,54	1,14
145	2,04	1,14
146	2,04	1,58
147	2,54	2,57
148	3,34	6,90
149	4,84	2,93
150	6,35	2,72

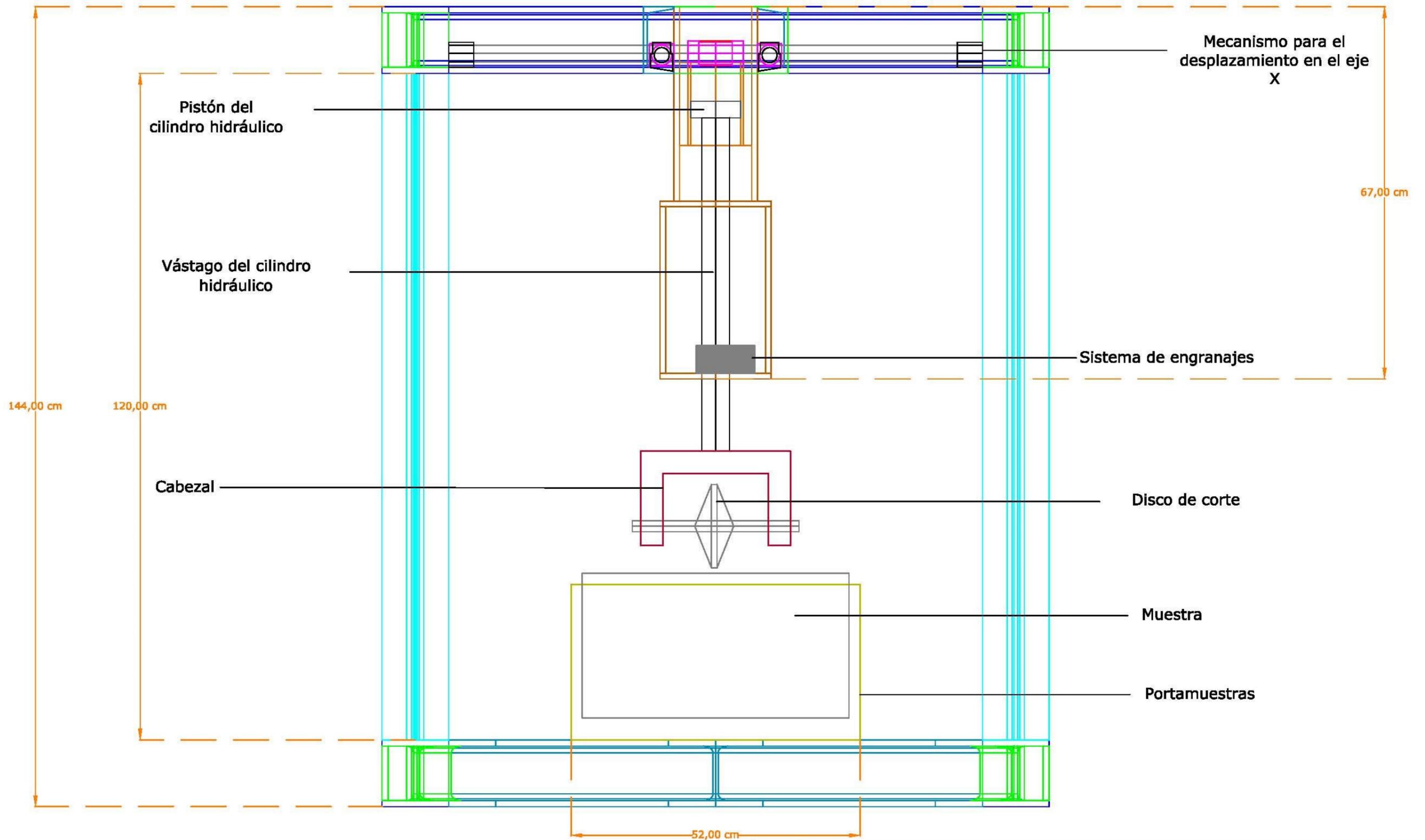
# ANEXO IV: PLANOS DEL EQUIPO DE ENSAYO



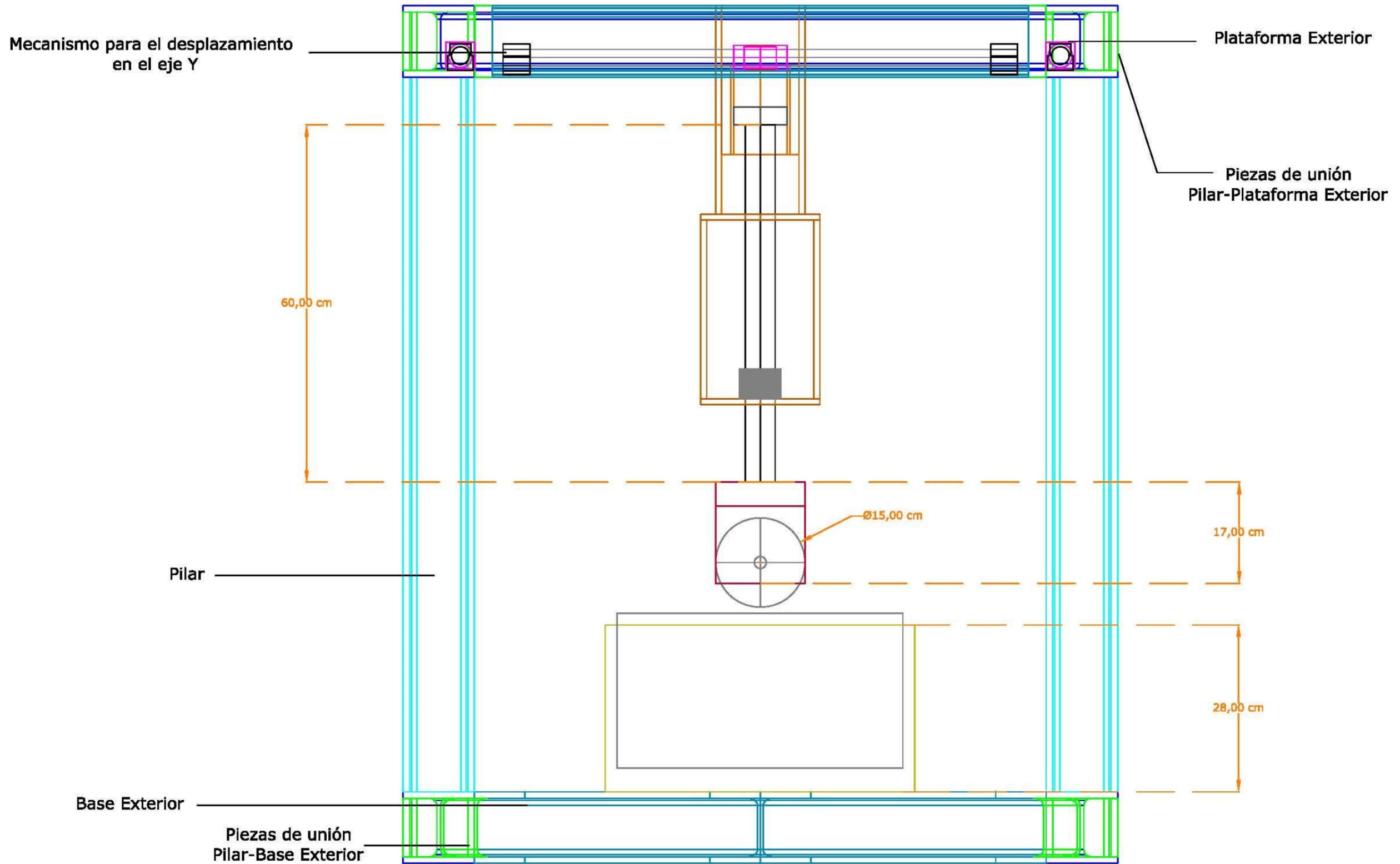
 <b>TRABAJO FIN DE MÁSTER</b> 	
<b>TÍTULO:</b> ANÁLISIS Y DISEÑO DE MÁQUINA DE ENSAYO DE DISCOS DE CORTE MEDIANTE METODOLOGÍA DE HURST	
<b>PLANO:</b> VISTA GENERAL DEL EQUIPO DE ENSAYO	
<b>AUTOR:</b> Carmen Covadonga García Fernández	
<b>HOJA:</b> 1 de 5	<b>FECHA:</b> Julio - 2013



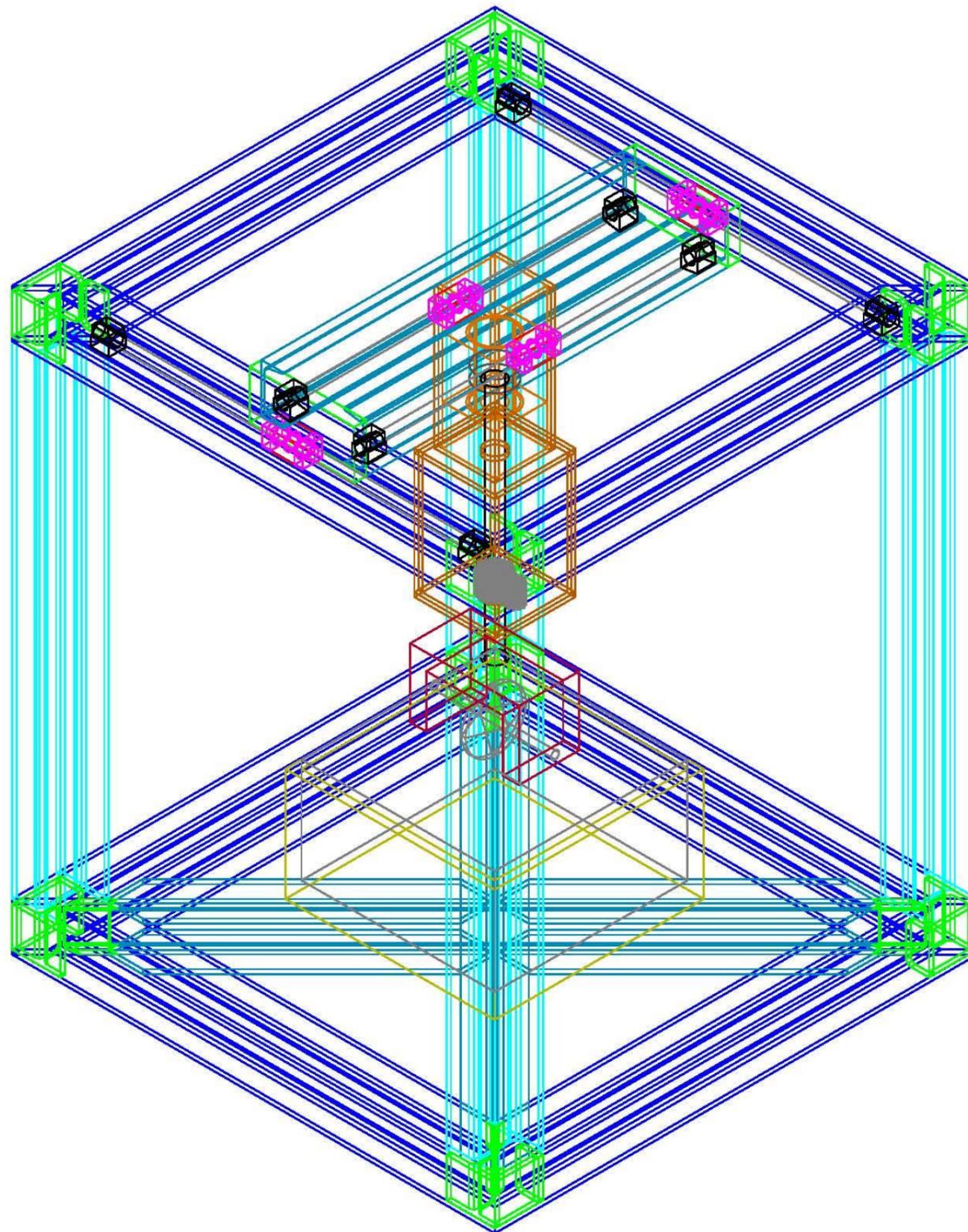
 <b>TRABAJO FIN DE MÁSTER</b> 	
<b>TÍTULO: ANÁLISIS Y DISEÑO DE MÁQUINA DE ENSAYO DE DISCOS DE CORTE MEDIANTE METODOLOGÍA DE HURST</b>	
<b>PLANO: VISTA EN PLANTA</b>	
<b>AUTOR: Carmen Covadonga García Fernández</b>	
<b>HOJA: 2 de 5</b>	<b>FECHA: Julio - 2013</b>



 <b>TRABAJO FIN DE MÁSTER</b> 	
<b>TÍTULO:</b> ANÁLISIS Y DISEÑO DE MÁQUINA DE ENSAYO DE DISCOS DE CORTE MEDIANTE METODOLOGÍA DE HURST	
<b>PLANO:</b> VISTA DE ALZADO	
<b>AUTOR:</b> Carmen Covadonga García Fernández	
<b>HOJA:</b> 3 de 5	<b>FECHA:</b> Julio - 2013



 <b>TRABAJO FIN DE MÁSTER</b> 	
<b>TÍTULO: ANÁLISIS Y DISEÑO DE MÁQUINA DE ENSAYO DE DISCOS DE CORTE MEDIANTE METODOLOGÍA DE HURST</b>	
<b>PLANO: VISTA DE PERFIL</b>	
<b>AUTOR: Carmen Covadonga García Fernández</b>	
<b>HOJA: 4 de 5</b>	<b>FECHA: Julio - 2011</b>



**TRABAJO FIN DE MÁSTER**



**TÍTULO:** *ANÁLISIS Y DISEÑO DE MÁQUINA DE ENSAYO DE DISCOS DE CORTE MEDIANTE METODOLOGÍA DE HURST*

**PLANO:** *VISTA EN 3D*

**AUTOR:** *Carmen Covadonga García Fernández*

**HOJA:** *5 de 5*

**FECHA:** *Julio - 2013*

# **ANEXO V: PATENTE DE INVENCIÓN DEL DISPOSITIVO**

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11) Número de publicación: **2 387 277**

21) Número de solicitud: 201200362

51) Int. Cl.:

**E21B 49/00** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

22) Fecha de presentación:

**30.03.2012**

43) Fecha de publicación de la solicitud:

**19.09.2012**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:

**01.10.2012**

Fecha de la concesión:

**17.01.2013**

45) Fecha de publicación de la concesión:

**29.01.2013**

73) Titular/es:

**UNIVERSIDAD DE OVIEDO (100.0%)  
C/ San Francisco, 3  
33003 OVIEDO (Asturias) ES**

72) Inventor/es:

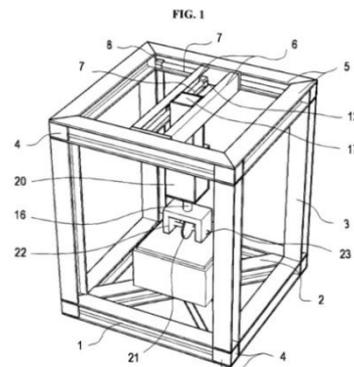
**ÁLVAREZ FERNÁNDEZ, M.Inmaculada;  
ÁLVAREZ VIGIL, Arturo;  
LÓPEZ GAYARRE, Fernando;  
GARCIA FERNÁNDEZ, Carmen Covadonga y  
GONZÁLEZ NICIEZA, Celestino**

54) Título: **Dispositivo y Método para la realización de ensayos que determinan el mecanismo de rotura sobre muestras de roca empleando discos de corte**

57) Resumen:

Dispositivo y método para la realización de ensayos que determinan el mecanismo de rotura sobre muestras de roca empleando discos de corte (21). El desplazamiento del disco de corte (21) sobre la muestra de roca sigue una trayectoria curva igual o proporcional a la de un disco de corte acoplado en la cabeza de corte de una tuneladora sobre el frente de excavación de un macizo rocoso. Con la utilización de dos discos (21) de forma simultánea también se comprueba la influencia de la interacción de las grietas inducidas por cada disco.

De aplicación en los sectores en que se diseñen, produzcan o utilicen dispositivos que empleen discos de corte para la excavación en roca, como es el caso de las TBM, con objeto de ayudar a una mejor optimización de la excavación subterránea gracias al análisis previo del mecanismo de rotura de la roca.



ES 2 387 277 B2

**DESCRIPCION**

**DISPOSITIVO Y MÉTODO PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS QUE DETERMINAN EL MECANISMO DE ROTURA SOBRE MUESTRAS DE ROCA EMPLEANDO DISCOS DE CORTE**

5 La presente invención se refiere a un equipo concebido para la realización de ensayos que determinan el mecanismo de rotura en muestras de roca empleando los discos de corte que habitualmente utilizan las máquinas utilizadas en la perforación y excavación de túneles, conocidas como *Tunnel Boring Machines* (TBMs) o más comúnmente denominadas tuneladoras o topos. Con el equipo diseñado se pueden  
10 analizar con detalle los parámetros involucrados en el proceso de excavación y estudiar el mecanismo de arranque que se origina en el macizo rocoso. La invención permite reproducir el giro de la herramienta con forma de disco, de un modo similar a la trayectoria curva real que realiza cuando va incorporada en la cabeza de una tuneladora que opera en el frente de excavación de una perforación subterránea. La  
15 invención también se refiere a un método de ensayo para determinar el mecanismo de rotura sobre muestras de roca empleando discos de corte.

La presente invención resulta de aplicación en los sectores en que se diseñen, produzcan o utilicen dispositivos que empleen discos de corte para la excavación en roca, como es el caso de las TBMs. Tiene como objeto ayudar a optimizar la  
20 excavación subterránea cuando en la perforación se emplean tuneladoras gracias a un análisis previo del mecanismo de rotura de la roca.

**ESTADO DE LA TÉCNICA**

En general, las máquinas empleadas para la excavación de un macizo rocoso, conocidas como *Tunnel Boring Machines* (TBM), excavan el frente de roca en la sección completa del túnel mediante la acción combinada de la rotación y el empuje. Durante la etapa de estudio y construcción de un proyecto de excavación es de vital importancia contar con la información necesaria sobre las condiciones de la roca y del método de excavación empleado. Así pues, los parámetros más importantes que  
25

pueden emplearse en el estudio y diseño de las TBMs se pueden dividir en dos categorías:

1. **Condiciones del macizo rocoso.** Incluyen parámetros relacionados con características de la roca intacta y del macizo rocoso:
  - 5 A. Características de la roca intacta:
    - Resistencia de la roca intacta (expresada como resistencia a compresión uniaxial, resistencia a tracción y/o índice de carga puntual  $I_{50}$ ).
    - Dureza (índice de penetración) y perforabilidad (DRI o Drilling Rate Index).
    - 10 - Índice de fragilidad (BI, expresado como el cociente entre la resistencia a compresión uniaxial y la resistencia a tracción).
    - Índice de abrasividad (índice de Cerchar CAI).
    - Otros (coeficiente de Poisson  $\nu$ , Módulo de Elasticidad E, ángulo de fricción interna  $\Phi$ , porosidad, tamaño de grano, etc.).
  - 15 B. Condiciones del macizo rocoso y discontinuidades:
    - Espaciamiento entre discontinuidades, Rock Quality Designation (RQD).
    - El ángulo entre el eje del túnel y los planos de debilidad.
    - Clasificación del macizo rocoso en base a índices como el RMR (Rock Mass Rate) o el índice Q.
    - 20 - Otros parámetros tales como las tensiones del macizo o afluencia de agua.
2. **Parámetros de la máquina TBM.** Entre estos parámetros destacan:
  - Empuje (carga por cortador).
  - Torsión.
  - Revoluciones por minuto (R.P.M.)
  - 25 - Potencia.
  - Especificaciones del disco, tales como el número de discos en la cabeza de corte, espaciamiento entre discos, el diámetro, anchura del filo, etc.

30 Para la predicción del rendimiento de las máquinas tuneladoras existen gran variedad de modelos. Algunos de ellos están basados, principalmente, en uno o dos parámetros de la roca, mientras otros se basan en una combinación de los resultados

obtenidos en el laboratorio y en el terreno junto con parámetros asociados a la máquina.

En general, los métodos para la predicción del rendimiento de las TBM se clasifican en dos categorías: modelos teóricos/experimentales (basados en ensayos de laboratorio encaminados a estudiar las fuerzas implicadas durante el proceso de excavación); y modelos empíricos (basados en estimaciones y estudios hechos sobre el terreno donde se establecen relaciones entre los parámetros mecánicos de la tuneladora y las características geomecánicas del macizo rocoso). A continuación se citan algunos de los métodos utilizados para predecir el rendimiento de las tuneladoras.

*Modelos teóricos/experimentales*

Los modelos teóricos/experimentales han sido utilizados por diferentes autores para hacer una estimación de las fuerzas que actúan en los discos de corte. Estimar estas fuerzas es un aspecto crítico en toda excavación pues permitirá la obtención de parámetros esenciales para predecir rendimientos, especificaciones en el tipo de máquina a emplear y las características adecuadas para una optimización de la cabeza de corte. En Graham, P. C. (1976), *Rock exploration for machine manufactures*. Symposium on Exploration for Rock Engineering Johannesburg, Balkema. 1: 80–173., Farmer, I. W.; Glossop, N. H. (1980), *Mechanics of disc cutter penetration*. Tunnels Tunnell, 12 (6): 22-25, Snowdon, A. R.; Ryley, D. M.; Temporal, J. (1983). *Study of Disc cutting in select British Rocks*. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 19, 107–121 y Sanio, H. P. (1985), *Prediction of the performance of disc cutters in anisotropy rocks*. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 22/3, 153–161 se pone de manifiesto una importante correlación entre la resistencia a compresión de la roca y la energía específica, definida esta última como la cantidad de energía necesaria para excavar una unidad volumétrica de roca. En Roxborough, F. (1975), *Research in Mechanical Rock Excavation: Progress and Prospects*. In. Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference, 1, 225 2 244. New York, USA, Ozdemir, L.; Miller, R.; Wang, F. D. (1978). *Mechanical Tunnel Boring Prediction and Machine Design*. Final Project Report to NSF APR73-07776-A03, Colorado School of Mines, Golden,

Colorado, USA, Sanio, H. P. (1985). *Prediction of the performance of disc cutters in anisotropy rocks*. Int. J. of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 22/3, 153–161, Sato, K.; Gong, F.; Itakura, K. (1991). *Prediction of disc cutter performance using a circular rock cutting ring*. In: Proceedings, The first  
 5 International Mine Mechanization and Automation Symposium, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA y Rostami, J.; Ozdemir, L. (1993). *A new model for performance prediction of hard rock TBM*. In: Bowerman, L. D., et al. (Eds.), Proceedings, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, pp. 793–809 se estudiaron  
 10 la influencia de las discontinuidades y planos de debilidad observando, en todos los casos, una significativa reducción de las fuerzas que actúan en el disco en presencia de juntas, excepto para juntas orientadas en dirección normal a la de corte.

En el mismo sentido, en el Departamento de Ingeniería de Excavación y Mecánica del Terreno (*Excavation Engineering and Earth Mechanics Department*) de la Universidad de Colorado (*Colorado School of Mines* o CSM) se desarrolló un modelo  
 15 de predicción de la velocidad de penetración en túneles. La primera versión de este modelo fue publicado en Ozdemir *et al.* (1978) y actualizada posteriormente en Rostami, J.; Ozdemir, L. (1993). *A new model for performance prediction of hard rock TBM*. In: Bowerman, L. D., et al. (Eds.), Proceedings, Rapid Excavation and Tunnelling Conference, pp. 793–809, Rostami, J. (1997). *Development of a force  
 20 estimation model for rock fragmentation with disc cutters through theoretical modeling and physical measurement of crushed zone pressure*. Ph. D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden Colorado, USA, p. 249. El modelo de CSM pretende hacer una estimación de la fuerza necesaria para una penetración dada, basándose en las propiedades de la roca, en las características del disco y en la geometría del corte. El  
 25 modelo se apoya en los resultados obtenidos a través de ensayos de laboratorio empleando un disco de corte en sentido lineal. El problema es que, aunque *a priori* este ensayo podría ayudar a descifrar las incertidumbres que no se identifican mediante los ensayos de caracterización de las rocas, tiene el inconveniente de realizarse únicamente en sentido lineal y no siguiendo una trayectoria curva, de tal  
 30 modo que no simula fielmente las condiciones reales de excavación con una cabeza de TBM.

Igualmente, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Ehime (Japón) (Muro, T.; Tschiya, K.; Kohno, K. (2002). *Experimental considerations for steady state edge excavation under a constant cutting depth for a mortar specimen using a disk cutter bit*. Journal of Terramechanics. Faculty of Engineering, Ehime University, Matsuyama, Ehime, 790–8577, Japan), se ha establecido un modelo de predicción de la mínima energía específica requerida en la excavación a partir del análisis de parámetros fundamentales, tales como las fuerzas involucradas en el corte, la potencia de la máquina durante la excavación, el espaciamiento entre discos, la profundidad de penetración y el ángulo del disco. Para establecer este modelo se realizó un ensayo con un disco de corte que simula de forma aproximada el giro del útil. El problema del modelo radica en el grado de representatividad de los resultados obtenidos debido a que la escala a la que se realiza el ensayo es de dimensiones excesivamente reducidas. Además, el giro del disco se simula gracias a una plataforma giratoria donde va situada la muestra y no reproduciendo el giro del disco tal como hace una cabeza de TBM.

#### *Modelos empíricos*

Existen métodos empíricos que, basándose en las variables que intervienen en la resistencia de un macizo rocoso y asignándoles valores numéricos de acuerdo a su incidencia, establecen relaciones matemáticas para obtener una característica numérica que permita estimar los diferentes parámetros de ejecución de un proyecto. Estos métodos se han establecido a través de estudios e investigaciones realizadas en campo. La principal ventaja de las investigaciones realizadas *in situ* sobre ensayos realizados en laboratorio es que contienen tanto aspectos relacionados con la máquina como propiedades del macizo rocoso. Fundamentalmente destacan dos métodos: el índice  $Q_{TBM}$  y el RME.

- El índice  $Q_{TBM}$  es una modificación del índice Q desarrollado por Barton, N. [(1999), *TBM performance estimation in rock using  $Q_{TBM}$* . Tunnels and Tunnelling International, pp. 30-34], para determinar las velocidades de penetración de una máquina excavadora. Este índice combina los parámetros del sistema de clasificación geomecánica de macizos rocosos Q con parámetros mecánicos de la máquina excavadora, como son la fuerza de empuje, el número de cortadores, las revoluciones

de la cabeza de corte y el índice de vida del cortador. Con la determinación de este índice se han establecido relaciones con la velocidad de penetración.

- En Bienawski, Z. T.; Tamames, B. C.; Fernández, J. M. G.; Hernández, M. A. (2006), *Rock Mass Excavability (RME) Indicator: new way to selecting the optimum tunnel construction method*. In: ITA-AITES World Tunnel Congress & 32nd ITA General Assembly, Seoul, se formula el RME (*Rock Mass Excavability*) como un índice para predecir la excavabilidad del macizo mediante tuneladoras para roca, proporcionando una cuantificación del rendimiento de las mismas y constituyendo una nueva herramienta para escoger el método constructivo de un túnel empleando TBMs.

Este índice se estableció a partir de un estudio en el que se determinó que los parámetros que tenían mayor influencia sobre la velocidad media de avance de las tuneladoras eran la perforabilidad, el espaciado de las discontinuidades y el tiempo de autoestabilidad de la excavación. A este grupo de parámetros más influyentes se decidió incorporar otros dos para definir el comportamiento del terreno ya que ambos tienen gran influencia en el rendimiento de las tuneladoras: la resistencia a compresión uniaxial de la roca intacta y el caudal de agua infiltrada en la excavación. Este índice tiene una estructura similar a la del RMR ya que se calcula sumando la valoración de los cinco parámetros anteriores. Con los resultados obtenidos se han establecido varias correlaciones entre el valor del índice y algún parámetro significativo como la velocidad media de avance.

El problema de estos métodos empíricos estriba en que, a través de diferentes estudios realizados (Blindheim, O. T. 2005. *A critique of  $Q_{TBM}$* . Tunnels & Tunnelling Int. Sapigni, M.; Berti, M.; Bethaz, E.; Busillo, A.; Cardone, G. 2002. *TBM performance estimation using rock mass classifications*. Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna, Italy; Palmstrom, A.; Broch, E. 2006. *Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-system*. Department of Geology and Mineral Resources Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway) se ha comprobado que utilizan parámetros en algunos casos irrelevantes e incluso confusos, en relación con el rendimiento de las TBM. Por otra parte, mediante estos métodos se obtiene una gran dispersión de resultados.

No se conoce en el estado de la técnica ninguna máquina para realizar ensayos sobre rocas que se desplace siguiendo el método de la invención, es decir, reproduciendo el giro del útil de corte y, por tanto, la trayectoria real de los discos en una cabeza de TBM. Tampoco se tiene conocimiento de procedimientos de ensayo que  
5 empleen más de un disco de corte actuando simultáneamente para analizar la importancia del espaciamiento entre ellos.

### **DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION**

La presente invención se refiere a un dispositivo concebido para la realización de  
10 ensayos que determinan el mecanismo de rotura de las rocas cuando se emplean discos de corte que habitualmente utilizan las máquinas tuneladoras para la perforación y excavación del subsuelo. Con el equipo se puede realizar un análisis de los parámetros involucrados en el proceso de excavación así como un estudio del mecanismo de arranque de la roca. La invención permite reproducir el giro del disco  
15 de modo similar a la trayectoria curva que realiza una cabeza de tuneladora en el frente de excavación de un macizo rocoso.

La invención también se refiere al método de ensayo empleando discos de corte.

Un objeto de la presente invención es un dispositivo para la realización de ensayos que determinan el mecanismo de rotura en muestras de roca que comprende:

- 20 a) Al menos un disco de corte desplazable que se pone en contacto con una muestra de roca y que rueda sobre ella.
- b) Un cabezal que aloja el disco de corte, desplazable a lo largo de tres ejes ortogonales X, Y, Z, donde el eje X es longitudinal horizontal, el eje Y es transversal horizontal, y el eje Z es vertical, y que pivota al menos alrededor  
25 del eje Z. A efectos de esta invención y su descripción, ortogonal debe entenderse igual a un valor angular de  $90^\circ$  con una desviación máxima admisible de  $\pm 5'$ .
- c) Unos medios motores controlados.

- d) Unos medios de transmisión que transmiten el movimiento de los medios motores y desplazan el cabezal.
- e) Unos medios de adquisición de datos del ensayo.
- f) Un armazón estructural que soporta y asegura la estabilidad del conjunto,  
5 incluyendo la muestra de roca.

A efectos de la presente invención y su descripción se aplica el concepto de “eje” a las direcciones de los diferentes desplazamientos de las partes móviles del dispositivo, siendo:

- Eje X es el eje en el que se realiza el movimiento longitudinal de la  
10 herramienta de corte (disco de corte).
- Eje Y es el eje en el que se realiza el movimiento transversal de la herramienta de corte.
- Eje Z es el eje en el que se realiza el movimiento perpendicular de la herramienta de corte hacia la muestra.
- 15 - El movimiento de rotación sobre el eje Z reproduce el giro de la herramienta de corte.

En una realización preferida, el dispositivo comprende dos discos de corte alojados en el interior del cabezal, acoplados a un mismo eje de giro y dispuestos para realizar ensayos simulando espaciamentos entre los dos discos comprendidos entre 5  
20 cm y 40 cm según el diámetro y el espesor del disco de corte, para resaltar la influencia de este parámetro en el mecanismo de rotura de la roca.

En otra realización preferida, los discos de corte son los de la cabeza de corte de una tuneladora.

En otra realización preferida, los medios motores controlados comprenden:

- 25 - Unos motores eléctricos con un regulador de velocidad y un codificador angular, asociados a cada movimiento del cabezal, lineal respecto a los ejes X, Y o angular respecto al eje Z.

- Una bomba hidráulica o neumática asociada al movimiento lineal del cabezal respecto al eje Z. Para la penetración del disco en la roca, se prefieren unos medios neumáticos o hidráulicos, que permiten la obtención de grandes potencias y poder de penetración.
- 5     - Un control eléctrico o electrónico de velocidad y de posición angular y/o de presión. Cada movimiento lineal es controlado independientemente por un motor o bomba específico para cada eje pero, al mismo tiempo, están acoplados para funcionar como una máquina de trabajo conjuntamente. Para ello es necesario disponer de un control numérico según los diferentes ejes. Los motores tienen
- 10    asociado un regulador de velocidad de giro del eje. Además, para completar todo este mecanismo electrónico existen codificadores rotatorios que convierten la posición angular de un eje a un código digital. Actúan como transductores que detectan la posición del eje para poder llevar a cabo el control del mismo de manera automática.
- 15    En una realización específica, los medios de transmisión comprenden:
  - Un conjunto de husillo de bolas y abrazadera que se desplaza a lo largo del eje X.
  - Un conjunto de husillo de bolas y abrazadera que se desplaza a lo largo del eje Y.
  - Un conjunto cilindro y vástago hidráulico o neumático asociado al cabezal y que se desplaza a lo largo del eje Z.
- 20    - Un conjunto de engranajes o poleas con correa asociados al cabezal (22) que lo giran alrededor del eje Z.

En otra realización más específica, el desplazamiento del disco de corte sobre la muestra de roca sigue una trayectoria curva igual o proporcional a la del disco de corte acoplado en la cabeza de corte de una tuneladora sobre el frente de excavación de un

- 25    macizo rocoso. Este mecanismo permite realizar ensayos de forma que el disco de corte describa una trayectoria curva reproduciendo la geometría real que siguen los discos en la rueda de corte o cabezal de las tuneladoras al excavar un frente rocoso.

En una realización preferida, los medios de adquisición de los datos de los ensayos

son una célula de carga, un transductor de presión o un manómetro.

En otra realización preferida, el armazón estructural a su vez comprende:

- Una base exterior en forma de paralelogramo.
- Cuatro pilares unidos por su extremos inferiores a la base exterior.
- 5     - Una plataforma exterior, en forma de paralelogramo y unida a los extremos superiores de los pilares, que contiene unos medios de transmisión que desplazan a lo largo del eje X, una plataforma interior.
  - Una plataforma interior que contiene unos medios de transmisión que desplazan a lo largo del eje Y, un armazón.
- 10    - Un armazón que contiene unos medios de transmisión que desplazan a lo largo del eje Z el cabezal, y unos medios de transmisión que giran el cabezal respecto al eje Z.
  - Un portamuestras que aloja una muestra de roca para su ensayo.

Otro objeto de la presente invención es un método para la realización de ensayos del mecanismo de rotura en muestras de roca que comprende las siguientes etapas:

- a) Colocar una muestra prismática de roca dentro del un portamuestras estable. El portamuestras que proporciona el confinamiento para realizar el ensayo.
- b) Poner en contacto perpendicularmente un disco de corte con la muestra haciendo coincidir el punto de contacto del disco de corte con cualquier punto de la cara superior de la muestra evitando el contacto del disco de corte con el portamuestras.
- 20    c) Aplicar una carga sobre el disco de corte perpendicular a la muestra de modo que el disco de corte penetre en la roca originando un corte en la misma.
- d) Desplazar el disco de corte sobre la cara a ensayar siguiendo una trayectoria curva igual o proporcional a la del disco de corte acoplado en la cabeza de corte de una tuneladora sobre el frente de excavación de un macizo rocoso.
- 25    e) Medir la huella generada como consecuencia del desplazamiento del disco de corte para estimar el volumen de roca arrancada según la carga aplicada según

la carga aplicada.

En una realización preferida, la carga de la etapa c) se determina en función de los resultados de un ensayo anterior para optimizar el mecanismo de rotura de la roca.

En otra realización preferida, en la etapa b) se ponen en contacto con la muestra dos discos de corte. En una realización más preferida, los discos de corte comparten el eje de rotación. En una realización aún más preferida, los espaciamientos entre los dos discos de corte se determinan en función de los resultados de un ensayo anterior para analizar la influencia de la interacción entre las tensiones inducidas por ambos discos.

La realización del ensayo permite analizar cómo será el mecanismo de rotura de la roca en función de las propiedades físicas y mecánicas asociadas a ella, determinadas previamente mediante ensayos de laboratorio, y debido a las características del propio disco. Esta información es muy útil a la hora de diseñar las máquinas tuneladoras.

La invención aporta, frente a los dispositivos que actualmente se conocen, una ventaja fundamental que radica en la posibilidad de desplazar el disco reproduciendo una trayectoria curva a medida que se va ensayando, a diferencia del resto de dispositivos mencionados donde el desplazamiento del disco o de la muestra es lineal. Este hecho permite simular fielmente las condiciones reales del disco de corte en una excavación realizada con una máquina tuneladora. Además, la utilización de dos discos de forma simultánea permite la realización del ensayo variando el espaciamiento entre ellos a fin de comprobar la influencia de la interacción de las grietas inducidas por cada disco en el mecanismo de arranque de roca.

La presente invención resulta de aplicación en los sectores en que se diseñen, produzcan o utilicen dispositivos que empleen discos de corte para la excavación en roca, como es el caso de las TBM, y tiene como objeto ayudar a una mejor optimización de la excavación subterránea empleando tuneladoras gracias a un análisis previo del mecanismo de rotura de la roca.

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Para complementar la descripción de la invención y facilitar su comprensión se acompaña un juego de dibujos donde, con carácter ilustrativo y no limitativo, se representa una realización del dispositivo objeto de esta patente, con la intención  
5 única de explicar gráficamente, a modo de ejemplo, la invención.

La Fig. 1 representa una vista en perspectiva del conjunto con los distintos componentes del dispositivo con los que se realizan los ensayos empleando un disco de corte (21).

La Fig. 2 representa un armazón estructural que soporta el dispositivo. La parte  
10 inferior de la estructura consiste en una base exterior (1) cuadrangular y una base interior (2) soldada a la anterior. En los extremos de la base exterior están dispuestos unos pilares (3) soldados. Debajo de ellos están situadas unas piezas de rigidización (4) que actúan como una prolongación de los pilares (3) en la base exterior (1) para mejorar la transmisión de esfuerzos. La parte superior se compone igualmente de una  
15 plataforma exterior (5) cuadrangular soldada a los pilares (3) en sus extremos, además de unas piezas de unión (4) para asegurar una mayor uniformidad en la transmisión de esfuerzos. En la parte central está dispuesta una plataforma interior (6) de constitución robusta por ser la zona de mayor sollicitación en la estructura.

La Fig. 3 representa parcialmente unos componentes para el mecanismo de  
20 desplazamiento según el eje X.

La figura muestra un husillo de bolas (7) que reproduce el movimiento lineal en dicho eje a través de un motor eléctrico acoplado directamente en el extremo del husillo de bolas (7) y que se dispone en la plataforma exterior (5). El husillo de bolas (7) a su vez está fijado a la estructura mediante dos unidades de soporte (8) situadas en  
25 los extremos de cada husillo de bolas (7). Así se consigue una sujeción de los husillos de bolas (7) a la máquina en un único conjunto. El husillo de bolas (7) va provisto de un componente que es la abrazadera (10) de tuerca que, a su vez, enlaza con la plataforma interior (6) para que, conjuntamente toda la estructura reproduzca el movimiento según el eje X.

La Fig. 4 representa parcialmente unos componentes para el mecanismo de desplazamiento según el eje Y.

La configuración para el desplazamiento según el eje Y mostrada en la figura es similar a la expuesta para el eje X salvo que en este caso se realiza en una plataforma interior (6). Para realizar dicho desplazamiento existen otros husillos de bolas (7) paralelos dispuestos en cada uno de los perfiles de la plataforma interior (6) y fijados mediante unas unidades de soporte (12) que aseguran los husillos de bolas (7) por sus extremos. Se muestran también unas tuercas (13) asociadas a una abrazadera (10) de tuerca desplazable según el eje Y que está unida a la estructura que incluye todo el mecanismo de accionamiento según el eje Z y el movimiento de rotación.

La Fig. 5 representa un cilindro hidráulico para el mecanismo de desplazamiento en el eje Z.

La figura muestra una plataforma interior (6) en la que hay un cilindro hidráulico (15). El cilindro (15) está dotado de un eje a lo largo del cual se extiende el vástago (16) además de la propia carcasa del cilindro con la correspondiente toma de entrada y salida de líquido hidráulico. La carcasa tiene una perforación por donde sale el vástago (16), una vez que la presión hidráulica actúa sobre el pistón. A su vez, este cilindro (15) se encuentra encerrado en el interior de un armazón (17) para soportar el cilindro (15). Este armazón (17) está unido lateralmente a las abrazaderas (10) de tuercas del eje Y para así permitir el desplazamiento a lo largo del mismo.

La Fig. 6 representa un sistema de engranajes para transmitir la rotación al cabezal (22) alrededor del eje Z.

El sistema de engranajes está formado por dos ruedas dentadas, engranaje conducido (18) y engranaje conductor (19), en las cuales se transmite el movimiento desde el eje motriz a través del engranaje conductor (19) hasta el vástago del cilindro (16) que, concéntrica y solidariamente, incorpora el engranaje conducido (18). El engranaje de mayor tamaño es el engranaje conducido (18) y el de menor tamaño el engranaje conductor (19). Con esta disposición, al transmitirse el giro del engranaje conductor (19) al engranaje conducido (18) se simula el empuje y el giro tal como sucede en los discos de corte (21) situados en la cabeza de corte de las máquinas

tuneladoras. Este mecanismo a su vez, se encuentra alojado en el interior de un armazón (20) que va acoplado al armazón (17) que contiene el cilindro (15) hidráulico..

La Fig. 7 representa la disposición del disco de corte (21) en el equipo de ensayo.

- 5 La figura muestra un disco de corte (21) igual a los que utilizan las máquinas tuneladoras. Se dispone alojado en el interior de un cabezal (22) a través de un eje (23). El cabezal va unido solidariamente al vástago (16) para simular el movimiento rotacional sobre el eje Z.

## 10 **EXPLICACIÓN DE UNA FORMA DE REALIZACIÓN PREFERENTE**

Para una mejor comprensión de la presente invención, se exponen los siguientes ejemplos de realización preferente descritos en detalle, que deben entenderse sin carácter limitativo del alcance de la invención.

### 15 EJEMPLO 1

- La estructura del equipo de ensayo estaba constituida por perfiles de acero normalizado distribuidos a modo de vigas y pilares (3). El armazón estructural estaba constituido por perfiles de acero normalizado del tipo S 275 JR distribuidos a modo de vigas y pilares (3) de 1,20 m de longitud como máximo, junto con rigidizadores (4)
- 20 para la mejor transmisión de esfuerzos entre los perfiles. La base exterior (1) constaba de cuatro perfiles HEB-120. Cada uno estaba cortado a 45° en sus extremos para soldarse en alas y alma al perfil adyacente y así conformar una estructura cuadrangular. Los cuatro pilares (3), de perfiles HEB-120, estaban situados sobre las esquinas de la base exterior (1) cuadrangular, dispuestos de tal manera que en sus
- 25 extremos estaban soldados en alas y alma tanto a la base exterior (1) como a la plataforma exterior (5). Para que las tensiones se transmitieran perfectamente en el armazón estructural se diseñaron unos rigidizadores (4) que actuaban como una prolongación de los pilares (3) en las HEB-120 en la base exterior (1) y en la

plataforma exterior (5). La base interior (2) constaba de cuatro perfiles HEB-120 cortados en sus extremos en ángulo recto según el punto central, con lo que podían soldarse entre sí en alas y alma en la zona central, y en el extremo opuesto con la base exterior (1) a lo largo de las alas. La plataforma exterior (6) estaba formada por cuatro  
5 perfiles HEB-120 cortados a 45° en sus extremos para soldarse en alas y alma al perfil adyacente y conformar una estructura cuadrangular. La plataforma interior (6) estaba constituida por dos perfiles UPN-120 que estaban unidos entre sí en sus extremos por piezas de acero para soldar ambos perfiles en alas y alma.

El desplazamiento del disco de corte (21) empleaba, como herramientas de guiado  
10 lineal en los ejes X e Y, husillos de bolas (7) de acero templado de dimensiones limitadas a las fijadas por los propios perfiles estructurales, y accionados mediante motores eléctricos para cada eje, sincronizados para transmitir el desplazamiento en el plano horizontal y accionados a expensas del mecanismo de automatización que permitía el control según los diferentes ejes. Los husillos de bolas (7) estaban fijados a  
15 la estructura mediante dos unidades de soporte (8) situadas en cada uno de sus extremos. Así se conseguía una sujeción adecuada de los husillos de bolas (7) a la máquina en un único conjunto. Las fuerzas para el desplazamiento eran suministradas por unos motores eléctricos que hacían girar los husillos de bolas (7) y hacían que se moviera sobre ellos la tuerca correspondiente. Estos motores incorporaban un  
20 regulador de velocidad de giro del eje. Además, incorporaban unos codificadores rotatorios que convertían la posición angular de los ejes X e Y a un código digital y, a través del mismo, permitían detectar la posición de los ejes X e Y de manera automática. Por último, los husillos (7) iban provistos de unas abrazaderas (10) de tuerca para que ambas estructuras pudieran efectuar los movimientos según los ejes X  
25 e Y.

El desplazamiento vertical en el eje Z era generado por un cilindro hidráulico (15) situado en la plataforma interior (6) capaz de proporcionar la potencia necesaria para que el disco de corte (21) pudiera penetrar en la roca. El cilindro hidráulico (15), además de una carcasa con la correspondiente toma de entrada y salida del líquido  
30 hidráulico, estaba dotado de un eje a lo largo del cual se extendía un vástago (16) cuando la presión hidráulica actuaba sobre el pistón. Con este mecanismo se realizaba

el desplazamiento según el eje vertical Z. El armazón estaba unido a las abrazaderas (10) de tuerca del eje Y para poder desplazarse según el mismo.

El mecanismo para la rotación de la herramienta se basó en un sistema de engranajes localizado justo debajo del cilindro hidráulico (15). Este mecanismo permitía realizar ensayos de forma que el útil de corte describiera una trayectoria curva reproduciendo la geometría real que siguen los discos en la cabeza de corte de las tuneladoras al excavar un frente rocoso. El sistema de engranajes estaba formado por dos ruedas dentadas en las cuales se transmitía el movimiento desde el eje motriz a través del engranaje conductor hasta el vástago del cilindro que, concéntrica y solidariamente, incorporaba el engranaje conducido. El engranaje de mayor tamaño era el engranaje conducido (18) y el de menor tamaño era el engranaje conductor (19). La transmisión del giro desde el engranaje conductor (19) al engranaje conducido (18) hacía girar el vástago (16) y se conseguía simular el empuje, la traslación y el giro tal como sucede en los discos de corte (21) situados en la cabeza de corte de las máquinas tuneladoras. Este mecanismo, a su vez, se encuentra alojado en el interior de un armazón que va acoplado al armazón que contiene el cilindro hidráulico (15).

La herramienta de corte empleada consistía en un disco de corte (21) igual a los que utilizaban las máquinas tuneladoras. Se dispuso alojado en el interior de un cabezal (22) a través de un eje (23). El cabezal (22) iba unido solidariamente al vástago (16) para simular el movimiento rotacional sobre el eje Z.

### EJEMPLO 2

Para llevar a cabo el método de ensayo, se utilizó una probeta que tenía forma de prisma cuadrangular con unas dimensiones de 40 cm × 40 cm × 40 cm. El portamuestras se construyó en acero templado S 275 JR con sus paredes laterales ajustables sobre su base a las caras laterales de la probeta ya que así se lograba el confinamiento para la realización del ensayo.

El sistema de captación automática de datos incorporaba una célula de carga de 0 a 100 kN y un sensor de desplazamiento de 0 a 500 mm sobre cada uno de los ejes. Las

señales que proporcionaban se podían grabar en un sistema de captación y almacenamiento de datos, materializado en dos tarjetas de adquisición de datos de forma continua.

Para el sistema de tratamiento de datos se utilizó un ordenador personal en el que  
5 funcionaba una aplicación informática propia, desarrollada por el Grupo de Investigación de Ingeniería del Terrenos de la Universidad de Oviedo, al que pertenecen los inventores.

A continuación se procedió a aplicar las etapas descritas en el método de la siguiente forma:

10 a) Se ubicó la muestra prismática de la roca objeto de ensayo en un armazón portamuestras que proporcionó el confinamiento para realizar el ensayo. La muestra se colocó de forma que el punto de contacto del disco de corte (21) sobre su cara superior quedara situado como mínimo a 30 mm de cualquiera de los bordes para que no se produjera el contacto del disco de corte (21) con el portamuestras.

15 b) Se dispuso el disco de corte (21) sobre la muestra de roca

c) Se aplicó una carga con una velocidad comprendida entre 0,2 MPa/s y 0,5 MPa/s mediante el disco de corte (21) sobre la roca, produciendo un corte en la misma.

20 d) Se desplazó el cabezal (22) que incorpora el disco de corte (21) sobre la superficie de ensayo. Esta operación se realizó accionado los mecanismos de desplazamiento, a una velocidad comprendida entre 0,1 y 1 mm/s, y de rotación, a una velocidad comprendida entre 0,01 rad/s y 0,1 rad/s, mediante un mecanismo de automatización que permitía el control según los diferentes ejes. La trayectoria seguida por el disco de corte (21) fue proporcional a la que describió un disco de corte  
25 (21) acoplado en la cabeza de corte de una tuneladora sobre el frente de excavación de un macizo rocoso.

e) Se midió la profundidad de la huella generada como consecuencia del desplazamiento del disco de corte (21) con una incertidumbre de medida de  $\pm 0,1$  mm y se estimó el volumen de roca arrancada según la carga aplicada.

30

A continuación se repitió el ensayo variando la velocidad de aplicación de la carga entre 0,5 MPa/s y 0,1 MPa/s a fin de conseguir optimizar el mecanismo de arranque de roca.

5 Por último, se repitió el procedimiento de ensayo empleando dos discos de corte (21). Se simularon espaciamientos entre los discos de corte (21) comprendidos entre 10 y 40 cm con el objetivo de analizar la influencia de la interacción entre las tensiones inducidas por ambos discos.

## REIVINDICACIONES

1. Dispositivo para la realización de ensayos que determinan el mecanismo de rotura en muestras de roca que comprende:
  - 5 a) al menos un disco de corte (21) desplazable que se pone en contacto con una muestra de roca y que rueda sobre ella;
  - b) un cabezal (22) que aloja el disco de corte (21), desplazable a lo largo de tres ejes ortogonales X, Y, Z, donde el eje X es longitudinal horizontal, el eje Y es transversal horizontal, y el eje Z es vertical, y que pivota al menos alrededor  
10 del eje Z;
  - c) unos medios motores controlados;
  - d) unos medios de transmisión que transmiten el movimiento de los medios motores y desplazan el cabezal (22);
  - e) unos medios de adquisición de datos del ensayo;
  - 15 f) un armazón estructural que soporta y asegura la estabilidad del conjunto, incluyendo la muestra de roca.
2. Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado por que comprende dos discos de corte (21) alojados en el interior del cabezal (22), acoplados a un mismo eje de  
20 giro (23) y con un espaciamiento entre los dos discos comprendido entre 5 cm y 40 cm.
3. Dispositivo según la reivindicación 1 ó 2 caracterizado por que el/los disco/s de corte (21) es/son el/los de la cabeza de corte de una tuneladora.
4. Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado por que los medios motores controlados comprenden:
  - 25 - unos motores eléctricos con un regulador de velocidad y un codificador angular, asociados a cada movimiento del cabezal (22) lineal respecto a los ejes X, Y o angular respecto al eje Z;

- una bomba hidráulica o neumática asociada al movimiento lineal del cabezal (22) respecto al eje Z;
  - un control eléctrico o electrónico de velocidad y de posición angular y/o de presión.
- 5 5. Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado por que los medios de transmisión comprenden un conjunto de husillo de bolas (7) y abrazadera (10) que se desplaza a lo largo del eje X; un conjunto de husillo de bolas (7) y abrazadera (10) que se desplaza a lo largo del eje Y; un conjunto cilindro (15) y vástago (16) hidráulico o neumático asociado al cabezal (22) y que se desplaza a lo largo del
- 10 eje Z; y un conjunto de engranajes o poleas con correa asociados al cabezal (22) que lo giran alrededor del eje Z.
6. Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado por que los medios de adquisición de datos de ensayo son una célula de carga, un transductor de presión o un manómetro.
- 15 7. Dispositivo según la reivindicación 1 caracterizado por que el armazón estructural a su vez comprende una base exterior (1) en forma de paralelogramo; cuatro pilares (3) unidos por su extremos inferiores a la base exterior (1); una plataforma exterior (5), en forma de paralelogramo y unida a los extremos superiores de los pilares (3), que contiene unos medios de transmisión que desplazan una
- 20 plataforma interior (6) a lo largo del eje X; una plataforma interior (6) que contiene unos medios de transmisión que desplazan un armazón (17) a lo largo del eje Y; un armazón (17) que contiene unos medios de transmisión que desplazan el cabezal (22) a lo largo del eje Z y unos medios de transmisión que giran el cabezal (22) respecto al eje Z; y un portamuestras que aloja una muestra de roca para su
- 25 ensayo.
8. Dispositivo según la reivindicación 3 caracterizado por que el desplazamiento del o de los disco/s de corte (21) sobre la muestra de roca sigue una trayectoria curva igual o proporcional a la del disco de corte (21) acoplado en la cabeza de corte de una tuneladora sobre el frente de excavación de un macizo rocoso.
- 30 9. Método para la realización de ensayos del mecanismo de rotura en muestras de

roca que comprende las siguientes etapas:

- a) colocar una muestra prismática de roca dentro de un portamuestras estable;
  - b) poner en contacto perpendicularmente un disco de corte (21) con la muestra haciendo coincidir el punto de contacto del disco de corte (21) sobre cualquier punto de la cara superior de la muestra evitando el contacto del disco de corte (21) con el portamuestras;
  - c) aplicar una carga sobre el disco de corte perpendicular a la muestra de modo que el disco de corte (21) penetre en la roca originando un corte en la misma;
  - d) desplazar un cabezal (22) que aloja el disco de corte (21) a lo largo de los ejes ortogonales X, Y y Z, a la vez que pivota al menos alrededor del eje Z, sobre la cara a ensayar siguiendo una trayectoria curva igual o proporcional a la del disco de corte (21) acoplado en la cabeza de corte de una tuneladora sobre el frente de excavación de un macizo rocoso;
  - e) medir la huella generada como consecuencia del desplazamiento del disco de corte (21) para estimar el volumen de roca arrancada según la carga aplicada.
10. Método según la reivindicación 9 caracterizado por que la carga de la etapa c) se determina en función de los resultados de un ensayo anterior para optimizar el mecanismo de rotura de la roca.
11. Método según la reivindicación 9 caracterizado por que en la etapa b) se ponen en contacto con la muestra dos discos de corte (21).
12. Método según la reivindicación 11 caracterizado por que los discos de corte (21) comparten el eje de rotación (23).
13. Método según la reivindicación 12 caracterizado por que los espaciamientos entre los dos discos de corte (21) se determinan en función de los resultados de un ensayo anterior para analizar la influencia de la interacción entre las tensiones inducidas por ambos discos.



FIG. 2

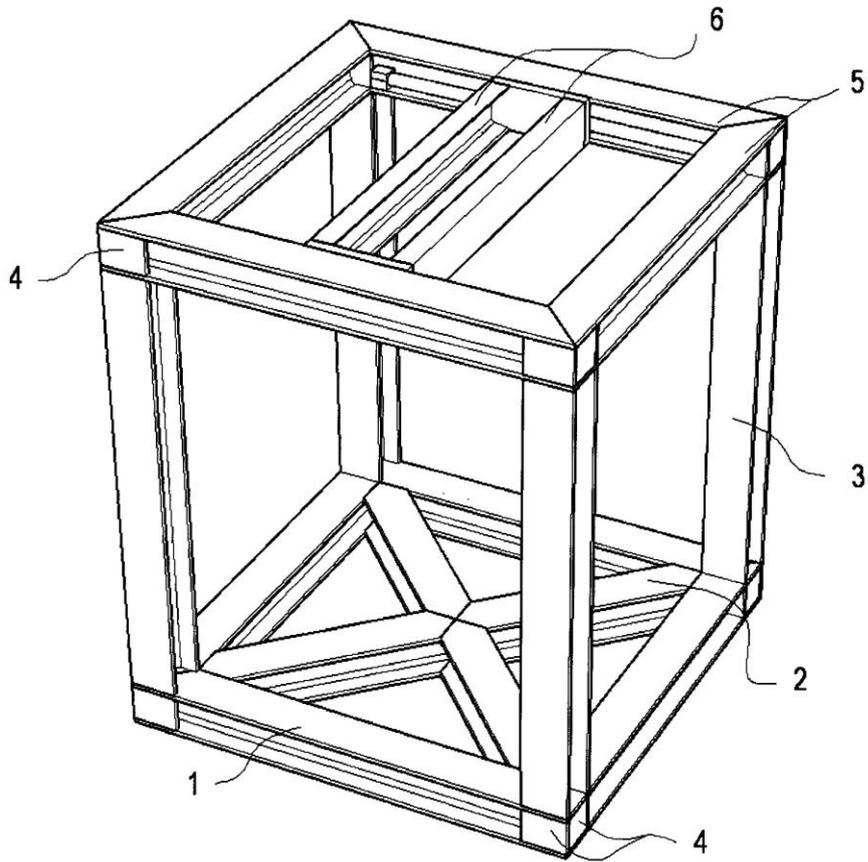


FIG. 3

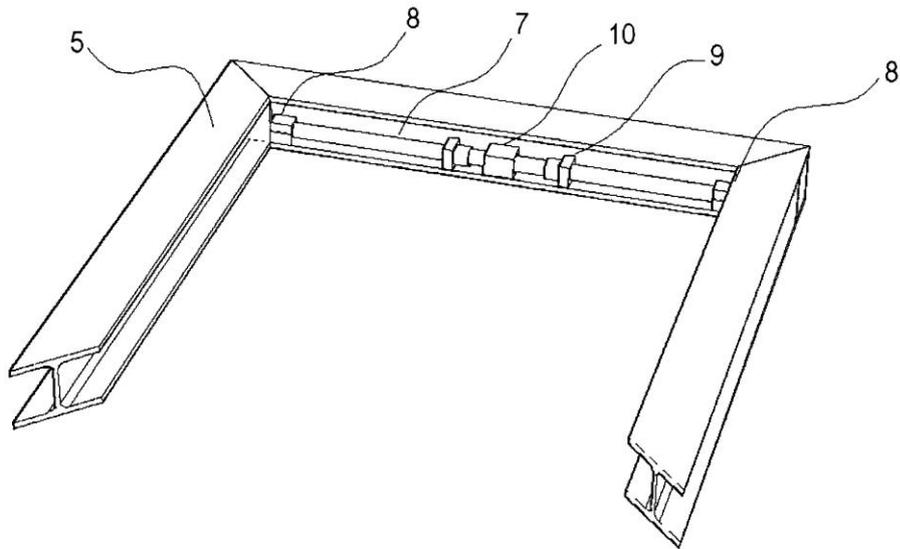


FIG. 4

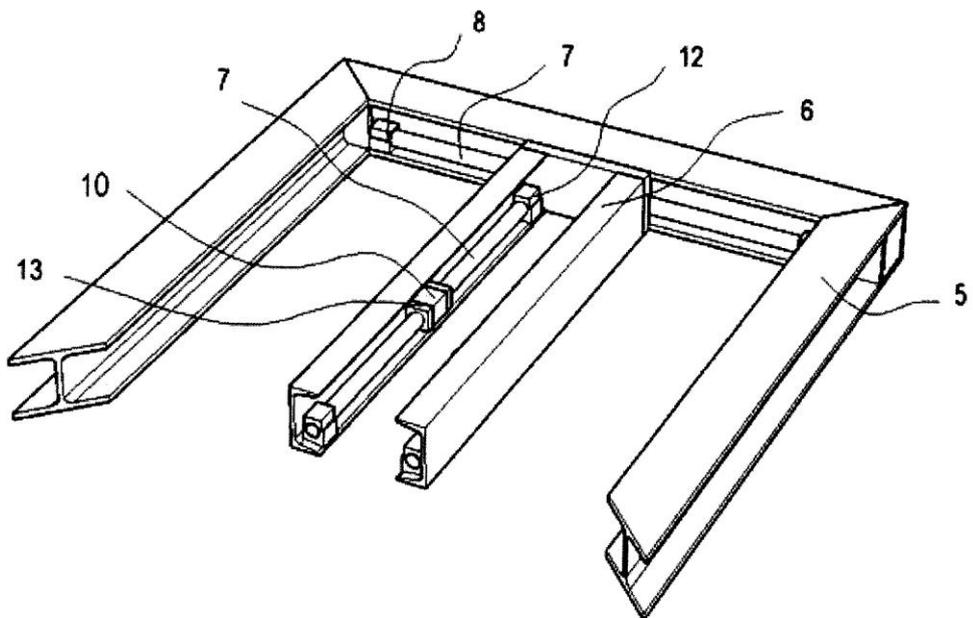


FIG. 5

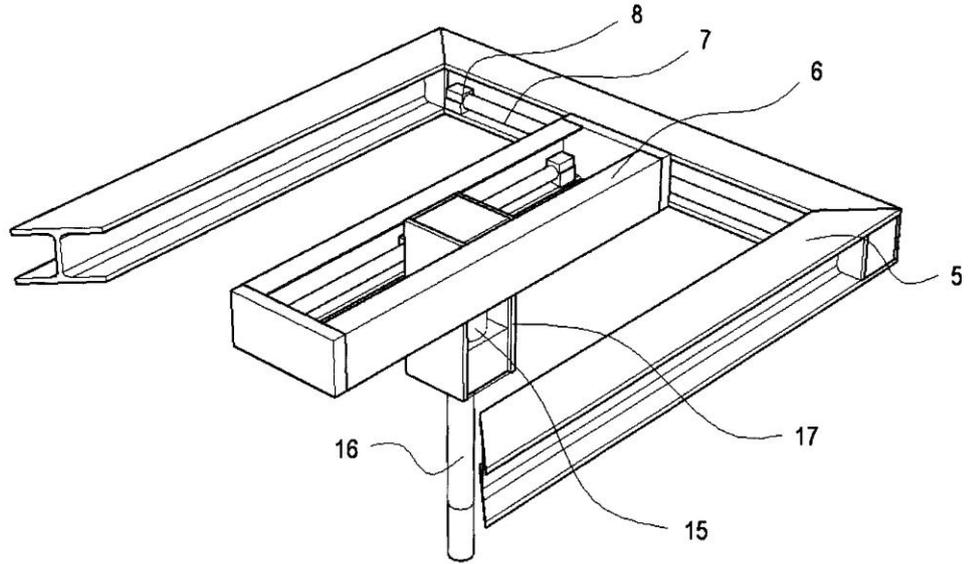


FIG. 6

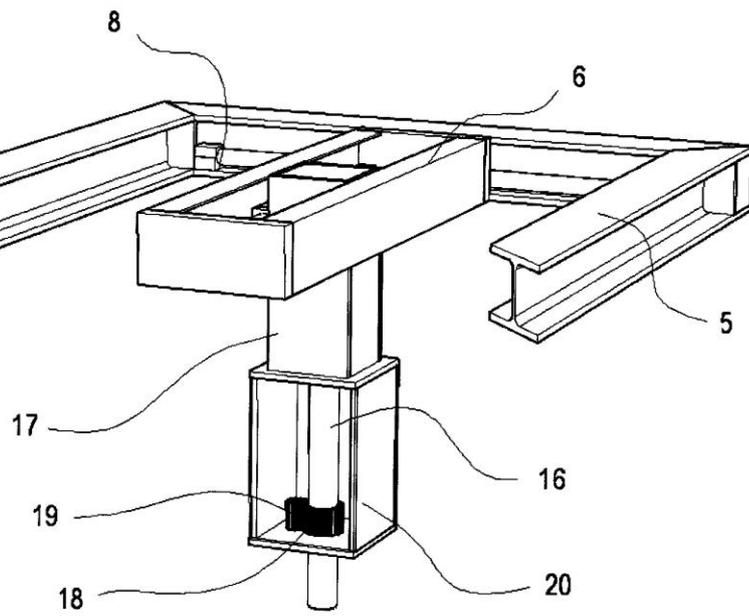
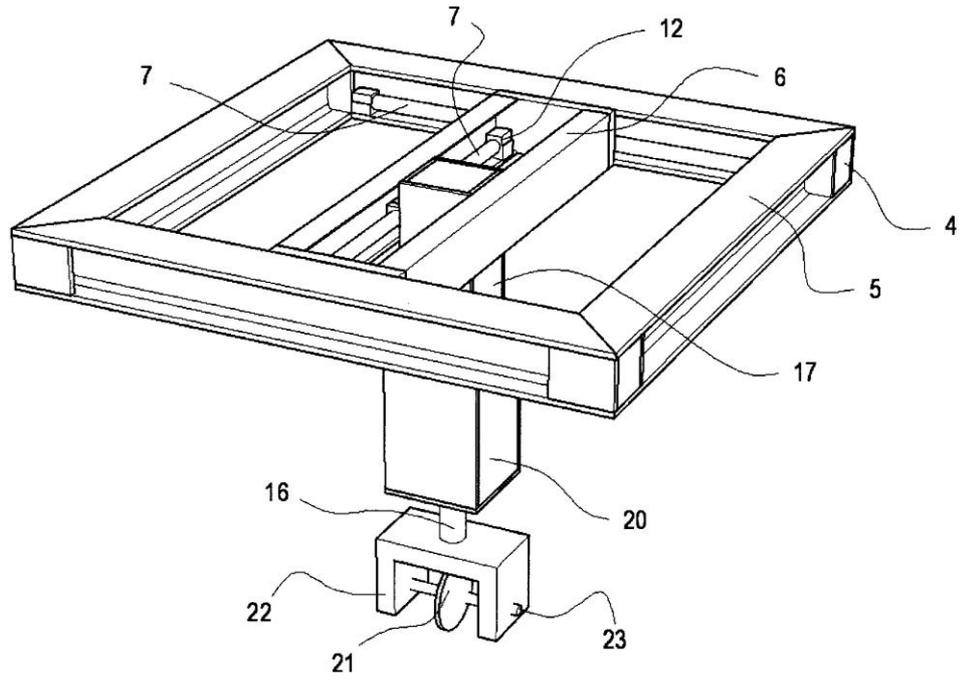


FIG. 7





OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA

- 21 N.º solicitud: 201200362  
22 Fecha de presentación de la solicitud: 30.03.2012  
32 Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

51 Int. Cl.: **E21B49/00** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	56 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A X	H. COPUR, N. BILGIN, H. TUNCDEMIR, AND C. BALCI, "A set of indices based on indentation tests for assessment of rock cutting performance and rock properties", The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Noviembre 2003, Páginas 589-599	1-8 9-13
A	US 2012059590 A1 (AMEEN) 08-03-2012, columnas 1- 2; párrafos [10 - 28]; figuras 1 - 2.	1-13
A	US 5670711 A (DETOURNAY ET AL.) 23-09-1997, columna 2, línea 48 - columna 4, línea 59; figuras 1 - 4.	1-13
A	Base de datos Epodoc en Epoque. European Patent Office (Munich , De). CN102221501 A (UNIV HEHAI) 19-10-2011 Resumen, figura 1	1-13
<p><b>Categoría de los documentos citados</b>  X: de particular relevancia  Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría  A: refleja el estado de la técnica  O: referido a divulgación no escrita  P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud  E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud</p>		
<p><b>El presente informe ha sido realizado</b>  <input checked="" type="checkbox"/> para todas las reivindicaciones      <input type="checkbox"/> para las reivindicaciones nº:</p>		
<b>Fecha de realización del informe</b> 31.08.2012	<b>Examinador</b> R. San Vicente Domingo	<b>Página</b> 1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

E21B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 31.08.2012

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-13	SI
	Reivindicaciones	NO
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-8	SI
	Reivindicaciones 9-13	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	H. COPUR, N. BILGIN, H. TUNCDEMIR, AND C. BALCI, "A set of indices based on indentation tests for assessment of rock cutting performance and rock properties", The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Noviembre 2003, Páginas 589-599	
D02	US 2012059590 A1 (AMEEN)	08.03.2012
D03	US 5670711 A (DETOURNAY et al.)	23.09.1997
D04	Base de datos Epodoc en Epoque. European Patent Office (Munich , De). CN102221501 A (UNIV HEHAL) 19-10-2011 Resumen, figura 1	

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

El documento D01 constituye el estado de la técnica más próximo a nuestra solicitud. En dicho documento, nos encontramos con un estudio en el que se hace una valoración de las propiedades de una determinada muestra de roca, y para ello se dispone de un dispositivo con al menos un disco de corte desplazable a lo largo de los tres ejes ortogonales y que se pone en contacto con la muestra, unos medios motores para transmitir el movimiento al cabezal del disco, medios para adquirir los datos del ensayo, y un armazón estructural para soportar al conjunto incluyendo la muestra de la roca. Por lo tanto la única diferencia entre el documento D01 y la 1ª reivindicación de la solicitud objeto de estudio sería la incorporación de un movimiento de rotación alrededor del eje Z al cabezal del elemento de corte, para la obtención de unas condiciones más reales en el resultado de una excavación llevada a cabo por una máquina utilizada en la perforación de túneles. Teniendo en cuenta esto, parece que no sería evidente para un experto en la materia que partiendo de dicho documento D01 se llegara a la invención propuesta en la 1ª reivindicación de la solicitud, ni tampoco encontramos dicha característica en ninguno de los documentos citados en el informe, por lo tanto dicha invención poseería novedad y actividad inventiva.

Con respecto al resto de reivindicaciones 2ª a 8ª, puesto que todas dependen directamente o indirectamente de la 1ª reivindicación, podríamos decir que también presentarían novedad y actividad inventiva.

En lo que se refiere al método para la realización de ensayos del mecanismo de rotura en muestras de roca desarrollado en la reivindicación independiente 9ª, diríamos que tal cual está descrito en dicha reivindicación resultaría obvio para un experto en la materia el llevarlo a cabo a partir de un dispositivo para la realización de ensayos como el descrito en el documento D01, y por lo tanto carecería de actividad inventiva. Las etapas desarrolladas en dicha reivindicación resultarían evidentes en la realización de cualquier ensayo de mecanismo de rotura en una muestra de roca, y cabría decir que la etapa d/ de desplazar el disco de corte sobre la muestra con una trayectoria curva o igual a la de una tuneladora carecería de carácter inventivo alguno, dicho de esa manera.

Para cumplir con dicho carácter inventivo habría que especificar que la trayectoria del cabezal además de desplazarse según los tres ejes ortogonales, realizara un movimiento de rotación alrededor del eje Z. Dicha característica quedaría implícita en la reivindicación 12ª, en la que se habla de que los discos de corte compartirían el eje de rotación, pero no con la suficiente claridad, por lo tanto, dicha reivindicación 12ª así como el resto de reivindicaciones 10ª, 11ª y 13ª, todas ellas dependientes de la reivindicación 9ª, tampoco cumplirían con los requisitos de novedad ni actividad inventiva. Se sugiere por lo tanto la inclusión en la reivindicación 9ª de que el movimiento del cabezal, además de desplazarse según los tres ejes ortogonales, también debería realizar un movimiento de rotación alrededor del eje Z, para que pueda subsanarse la objeción de falta de actividad inventiva explicada anteriormente.

El resto de documentos D02 a D04 reflejarían el estado de la técnica general.

A modo de resumen, podríamos concluir que ni el documento D01 más cercano a nuestra solicitud, ni ninguno de los documentos D02 a D04, afectarían a la novedad ni a la actividad inventiva del dispositivo para la realización de ensayos para la determinación del mecanismos de rotura en muestras de roca, tal cual es descrito en las reivindicaciones 1ª a 8ª del documento presentado por el solicitante, pero que sí quedaría cuestionada la actividad inventiva del método llevado a cabo para la realización de dicho ensayo a partir del documento D01, tal cual es descrito en las reivindicaciones 9ª a 13ª de la solicitud, y teniendo en cuenta los requisitos de patentabilidad según los artículos 6 y 8 de la ley 11/86 de patentes.