

Diseño y Cálculo de la Cámara Interior de un Molino de Cono para la Trituración de Áridos



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Sergio Serrano Diaz

Jesús Joaquín Domínguez Segura

Pamplona, 21 de enero de 2022

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

RESUMEN

El objetivo principal del proyecto es el diseño y cálculo de las solicitaciones de los componentes de la cámara de un molino secundario para la trituración de áridos. Este proyecto surge como una propuesta por parte de la empresa Tecymacan, que busca ampliar su catálogo de equipos de trituración. Es un proyecto en el que se ha necesitado una fase inicial muy costosa de investigación para conseguir todos los datos necesarios para comenzar con el diseño. Posteriormente, se ha enfocado el cálculo de las solicitaciones de dos formas. En la primera de ellas, se han realizado los cálculos con la ayuda de un manual de resistencia de materiales, con la intención de conocer las tensiones y deformaciones que se van a producir en la cámara de trituración como consecuencia de los esfuerzos de compresión. En la siguiente fase de diseño, se ha realizado una simulación en Ansys para obtener unos resultados mucho más precisos. Finalmente se han comparado y analizado los resultados obtenidos.

PALABRAS CLAVE

Triturador de cono, cámara de trituración, árido, tensiones, deformaciones, cantera.

ABSTRACT

The main objective of the project is designing and calculating the forces supported by the components of a secondary crushing chamber, which is used to crush arids. This project arises as a proposal by Tecymacan, which seeks to expand its catalog of crushing equipment. The first phase was a hard part due to the difficulties of searching for the initial data, measures, materials, parameters that allow to start with the design. Subsequently, the calculations were based in two ways. In the first one, they were done with the support of a material resistance manual, which objective was to know the stress and deformation that the crushing chamber is going to support due to compression stress. In the following phase, it was made a simulation using Ansys to obtain more accurate results. At last, the final data obtained in both ways have been compared and analyzed.

KEYWORDS

Cone crusher, crushing chamber, arid, stress, deformation, quarry.

ÍNDICE DE DOCUMENTOS

1. DOCUMENTO 1: MEMORIA

2. DOCUMENTO 2: PLANOS

MEMORIA

DOCUMENTO 1

Índice de Contenido

<i>RESUMEN</i>	1
<i>PALABRAS CLAVE</i>	1
<i>ABSTRACT</i>	1
<i>KEYWORDS</i>	1
Índice de figuras	3
Índice de Tablas	5
1. Introducción.....	6
2. Objetivo	6
3. Antecedentes.....	8
4. Normativa aplicable.....	9
4.1 Directiva de máquinas	9
4.2 Legislación minera	9
4.3 Normativa medioambiental.....	10
4.4 Puesta en mercado de los áridos	10
5. Definición de la necesidad.....	11
5.1 La Empresa	11
6. Estado del arte.....	11
7. Datos de partida	12
7.1 Clasificación de los áridos	12
7.1.1 Procedencia	12
7.1.2 Forma	12
7.1.3 Caras de fractura	13
7.1.4 Densidad.....	13
7.1.5 Dureza	13
7.2 Fragmentación	13
7.3 Análisis mecánico de las rocas	14
7.3.1 Introducción	14
7.3.2 Resistencia a la compresión	14

7.3.3 Resistencia al impacto, desgaste y fragmentación	15
7.3.4 Índice de Bond.....	16
7.3.5 Índice de Abrasión.....	16
7.3.6 Triturabilidad	17
7.3.7 Humedad	18
7.3.8 Análisis granulométrico.....	18
7.4 Plantas fijas para el tratamiento de áridos naturales.....	20
7.4.1 Introducción	20
7.4.2 Alimentación	21
7.4.3 La trituración	22
7.4.4 Lavado	24
7.4.5 Clasificación.....	25
7.4.6 Transporte	26
7.5 Especificaciones técnicas del molino de cono	26
7.5.1 Funcionamiento	26
8. Cálculo y análisis de los componentes	30
8.1 Cálculos mediante Manual de Resistencia de Materiales	30
8.1.1 Introducción	30
8.1.2 Tensiones principales y desplazamientos en la cámara exterior.....	32
8.1.3 Tensiones principales y desplazamientos en la cámara interior	35
8.1.4 Análisis de los resultados. Conclusiones	37
8.2 Cálculo mediante elementos finitos	38
8.2.1 Introducción	38
8.2.2 Características del material a ensayar	38
8.2.2 Resultados obtenidos en la cámara exterior	41
8.2.3 Resultados obtenidos en la cámara interior	47
8.2.4 Ensayo de impacto	49
8.3 Análisis de vibraciones para mantenimiento predictivo	52
8.3.1 Introducción	52
8.3.2 Condition Monitoring.....	52
8.3.3 Mantenimiento predictivo en equipos de trituración. Puesta en marcha	52
8.3.4 Análisis dinámico de vibraciones en Molino Aremar I-D	53

9. Desarrollo de sistemas de mejora para un molino de cono.....	57
9.1 Estudios realizados.....	57
10. Conclusiones.....	59
Bibliografía.....	60

Índice de figuras

Figura1. Variaciones de consumo anuales de áridos en la construcción [6]	8
Figura2. Tipos de árido [5]	12
Figura3. Ensayo de resistencia a la compresión [8]	15
Figura4. Equipo para determinar el índice de abrasión.....	17
Figura5. Valores límite del índice de triturabilidad en los áridos para hormigones [7] 17	
Figura6. Material para el análisis granulométrico	18
Figura7. Grafica granulométrica[8]	19
Figura8. Esquema de funcionamiento de una cantera	20
Figura9. Equipos de procesado de áridos de una cantera	21
Figura10. Alimentador de áridos	22
Figura11. Trituradora de mandíbulas	23
Figura12. Trituradora giratoria	23
Figura13. Molino impactor	24
Figura14. Tromel de lavado de áridos	25
Figura15. Criba de áridos.....	25
Figura16. Cintras transportadoras de áridos en una cantera	26
Figura17. Esquema de funcionamiento de un molino de cono en corte transversal [2] 27	
Figura18. Esquema de funcionamiento de un molino de cono en planta [2].....	27
Figura19. Distancia nominal del reglaje en función del tiempo [2]	28
Figura20. Corte transversal de un molino de cono [9].....	29
Figura21. Plano del ensamblaje simplificado para cálculos teóricos	31
Figura22. Tensiones principales en un cilindro de pared gruesa [7].....	32
Figura23. Fórmulas de cálculo para cilindros de paredes gruesas [7]	32

Figura24.	Representación gráfica de las tensiones tangenciales y radiales frente al reglaje	35
Figura25.	Fórmulas de cálculo para cilindros de paredes gruesas [7]	35
Figura26.	Representación gráfica de las tensiones tangenciales y radiales frente al reglaje	37
Figura27.	Deformaciones de la cámara interior [9]	39
Figura28.	Tensiones admisibles y límites de fatiga de fundiciones ordinarias y específicas [7]	39
Figura29.	Campana exterior	40
Figura30.	Campana interior	40
Figura31.	Ensamblaje de los componentes de trituración.....	41
Figura32.	Mallado de la campana exterior.....	42
Figura33.	Soporte de la campana exterior	42
Figura34.	Tensiones máximas de von Mises de la cámara exterior calculadas en Ansys	43
Figura35.	Deformaciones máximas de la cámara exterior calculadas en Ansys.....	44
Figura36.	Tensiones máximas de la cámara exterior calculadas en Ansys	44
Figura37.	Tensiones de von Mises de la cámara exterior calculadas en Ansys	45
Figura38.	Deformaciones de la cámara exterior calculadas en Ansys	45
Figura39.	Tensión máxima en la cámara exterior calculada en Ansys	46
Figura40.	Mallado de la cámara interior	47
Figura41.	Soporte de la campana interior.....	48
Figura42.	Deformaciones máximas de la cámara interior calculadas con Ansys.....	48
Figura43.	Tensión máxima de von Mises de la cámara interior calculada con Ansys	49
Figura44.	Tensiones máximas de la cámara exterior calculadas con Ansys	49
Figura45.	Mallado de la cámara interior y del árido a triturar.....	50
Figura46.	Resultados del impacto. Tensión equivalente de von Mises calculada con Ansys	50
Figura47.	Resultados fallidos del impacto calculado con Ansys	51
Figura48.	Medición de las vibraciones en la puesta en marcha de un molino impactor	54
Figura49.	Normativa sobre vibraciones en base al tipo de máquina [1]	54

Figura50.	Gráfica de frecuencias obtenidas en la puesta en marcha de un molino impactor	55
Figura51.	Gráficas de identificación de fallo aportadas por el fabricante [1].....	56
Figura52.	Gráficas de identificación de fallo aportadas por el fabricante [1].....	56
Figura53.	Potencia en 1,5 segundos de operación [2]	57

Índice de Tablas

Tabla1.	Resistencia a compresión de los minerales [5]	13
Tabla2.	Tensiones principales y deformaciones en la cámara exterior.....	33
Tabla3.	Tensiones principales y deformaciones en la cámara interior	36

1. Introducción

En muchas ocasiones, cuando éramos pequeños, nos hemos preguntado cuál era la finalidad de esos enormes agujeros situados en medio de la montaña, y para qué se necesitaría tal cantidad de piedras y arena. Después de unos meses trabajando en el sector de los áridos, he comprendido que la explotación de los recursos minerales que se realiza en las canteras es imprescindible para el desarrollo de cualquier país, siendo el árido el segundo elemento de mayor consumo después del agua. Entre las aplicaciones, se encuentra la elaboración de hormigones, morteros, aglomerados asfálticos, bases para carreteras, balastos para vías ferroviarias y escolleras para la defensa y construcción de puertos marinos.

Hoy en día, este sector está experimentando un crecimiento considerable en la producción y desarrollo de nuevas tecnologías para mejorar los equipos de procesamiento de áridos. Es por ello, que muchas de las empresas dedicadas a la industria de los áridos, están realizando nuevos proyectos de innovación para el desarrollo de maquinaria que pueda abarcar la creciente demanda y los nuevos procesos de producción. Desde la empresa Tecymacan se ha planteado el diseño y fabricación de un nuevo modelo de triturador, y mediante el proyecto que nos ocupa se tratará de documentar y explicar todas las fases de diseño para llegar al objetivo establecido de comercializar el modelo de triturador.

2. Objetivo

El objetivo del proyecto que se expondrá a continuación es el del diseño y dimensionamiento de la cámara interior de un molino de cono para la trituración de áridos. Para ello, se recurrirá al análisis de los componentes mediante el estudio por elementos finitos con el programa Ansys. Se realizarán además los cálculos de las tensiones que sufrirán los componentes de forma manual con la ayuda de un manual de resistencia de materiales y se compararán los resultados. Además, se estudiarán diferentes propuestas para mejorar los equipos de trituración giratoria actuales, buscando una mayor eficiencia energética, funcionalidad del dispositivo y calidad del producto final. Se ha realizado una planificación de las distintas fases en las que se va a desarrollar el proyecto completo del triturador de cono que serán detalladas a continuación. La duración estimada para completar las 4 fases es de 3 años. La duración para cada una es de 6 meses para la fase I, 18 meses para la fase II, 6 meses para la fase III y 6 meses para la fase IV. Con la realización del proyecto que se plantea a continuación, se habrá completado la fase I de la planificación realizada para el diseño, fabricación, y comercialización de un triturador de cono para áridos. Una vez finalizada esta primera fase del diseño, se continuará con la programación de las distintas fases desde la empresa Tecymacan.

FASE I

- Dispositivos actuales en el mercado. ¿Cómo los puedo mejorar?
- Dimensionamiento.
- Normativa aplicable.
- Recursos para desarrollar el proyecto.
- Planificación de fases y tiempos previstos
- Características técnicas áridos, materiales, factores de diseño.
- Estudio de las cámaras trituración por elementos finitos.
- Estudio de las cámaras de trituración con cálculo teórico.
- Desarrollo de los sistemas de mejora. Estudio volante de inercia.

FASE II

- Sistema eléctrico.
- Sistema hidráulico.
- Sistema de transmisión de potencia.
- Sistema de lubricación.
- Sistema de limpieza.
- Diseño de la estructura.
- Diseño de sistema excéntrico.
- Diseño de la estructura.
- Acabados.
- Procesos de fabricación.

FASE III

- Selección de los elementos comerciales.
- Diseño de detalle de los elementos de fabricación.
- Documentación técnica: planos, lista de materiales, instrucciones de montaje.
- Validación y modificaciones.
- Análisis de los resultados de las pruebas y estudios de calidad y fiabilidad.
- Catálogo de componentes y mantenimiento.

FASE IV

- Industrialización y prototipado.
- Fabricación.
- Presupuesto.
- Puesta en marcha y mantenimiento predictivo.
- Condition Monitoring.
- Lanzamiento del producto.

3. Antecedentes

Según la Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos [6], “los áridos se definen como una serie de rocas que, tras sufrir un proceso de tratamiento industrial, son empleados en la industria de la construcción”. Se calcula que cada español ha consumido en 2016, unos 2070 kilogramos anuales, es decir 5,7 kilogramos diarios [6].

Al igual que otros sectores en España, el sector de los áridos ha sufrido una grave crisis durante el año 2008, llegando a uno de los peores niveles de producción histórico. En los años anteriores el sector no paraba de crecer hasta el año 2006, momento en el que el sector comenzó a descender de forma brusca. Sin embargo, la creciente demanda de estos productos ha hecho que múltiples empresas relacionadas con el sector pongan en funcionamiento graveras y canteras para abastecer la demanda generada por los diferentes sectores.

En España, las reservas de áridos se consideran prácticamente ilimitadas. Los únicos factores limitantes son la inaccesibilidad del terreno, situación geográfica, costes de transporte y explotación, emplazamientos protegidos, impacto ambiental, etc.



Figura1. Variaciones de consumo anuales de áridos en la construcción [6]

4. Normativa aplicable

4.1 Directiva de máquinas

- **Real Decreto 2008¹**, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.

4.2 Legislación minera

Dependiendo del uso al que se les vaya a someter, los áridos deberán tener, según normativa, unas determinadas características que dependerán de su composición química y de los diferentes procesos utilizados en su producción. Las características que se deberán tener en cuenta son las siguientes:

- Propiedades geométricas: tamaño, forma de las partículas, caras de fractura, calidad de los finos, etc.
- Propiedades mecánicas y físicas: resistencia al desgaste, resistencia a la fragmentación, resistencia al pulimento, densidad, porosidad, contenido en agua, etc.
- Propiedades térmicas y de alteración: resistencia a los ciclos de hielo y deshielo, etc.
- Propiedades químicas: contenido en azufre, cloruros, materia orgánica, contaminantes ligeros, reactividad potencial, etc.

Para la unificación de las diferentes características se han desarrollado una serie de normas y ensayos que son comunes en todos los países miembros de la Unión Europea. De esta manera, se asegura el cumplimiento de los requisitos de calidad exigidos obteniendo el marcado CE según la norma de 2015².

Además, existe una norma que regula los ensayos y las propiedades de los áridos; Parte 5: "Equipo común y calibración", siguiendo la norma actual³.

Normativa referente a especificaciones técnicas y requerimientos de seguridad:

- 2015⁴ *Building construction machinery and equipment – Mobile crushers - Part 1: Terminology and commercial specifications*
- 2009⁵ *Building construction machinery and equipment -- Mobile crushers -- Part 2: Safety requirements*

¹ Real Decreto 1644/2008

² UNE en ISO 9001-2015

³ UNE-EN 932-5:2000

⁴ ISO 21873-1:2015

4.3 Normativa medioambiental

Normativa referente a la gestión de residuos y medio ambiente:

- Directiva⁶ de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Se establece dentro del marco jurídico europeo la necesidad de reducción de la cantidad de residuos y el impacto producido por los mismos en el medio ambiente y la salud humana.
- Ley de Montes 2015⁷, de 21 de julio, tiene por objeto garantizar la conservación y protección de los montes promoviendo su restauración y aprovechamiento racional.
- Ley de Ruido del 2003⁸ y Directiva sobre evaluación y gestión del ruido ambiental de 2002/49/CE, de 25 de junio que establece los cimientos en los que asentar el acervo normativo en materia de ruido.

4.4 Puesta en mercado de los áridos

La comercialización de los áridos en el territorio europeo esté regulada por el Reglamento de Productos de la Construcción de 2011⁹.

⁵ ISO 21873-2:2009

⁶ 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo

⁷ Ley de Montes 21/2015

⁸ Ley de Ruido, 37/2003

⁹ Reglamento (UE) Nº 305/2011 del Parlamento Europeo y del consejo de 9 de marzo de 2011.

5. Definición de la necesidad

5.1 La Empresa

Tecymacan es una empresa situada en la localidad de Sarasa que está especializada en la fabricación de maquinaria para el sector de la construcción y obra pública, principalmente en el campo de la producción de áridos. Cuenta con un departamento de I+D+i en el que se quiere diseñar y empezar a fabricar y comercializar un nuevo modelo de triturador. Esta maquinaria es el triturador de cono, que recibe este nombre debido a la geometría de su cámara interior. Con la fabricación de este molino, Tecymacan se convertiría en la primera empresa española que diseña y fabrica este tipo de maquinaria en sus propias instalaciones y lo comercializa, ya que actualmente este tipo de trituradores son importados de otros países debido a la complejidad de diseño, fabricación y puesta en marcha.

Como se ha mencionado anteriormente la duración estimada de este proyecto será de unos 3 años, teniendo en cuenta todas las fases de diseño, proceso de fabricación, selección de proveedores, pruebas, puesta en marcha, etc. Por lo tanto, mediante el presente trabajo de fin de grado se pretende dar los primeros pasos realizando los estudios de los componentes de la cámara interior del molino de cono mediante un estudio de elementos finitos, que será corroborado con el cálculo de los esfuerzos en dichos componentes con la ayuda de un manual de resistencia de materiales.

6. Estado del arte

Los trituradores de cono son los equipos de conminución con mayor complejidad debido a su diseño y fabricación. Es por ello que, únicamente una docena de fabricantes en el mundo se dedican al diseño y comercialización de estos equipos. La cámara de trituración de un triturador de cono es uno de los elementos más complejos de todos los equipos de conminución que existen.

Desde su creación, los trituradores de cono han sido los equipos que han sufrido una mayor evolución. Inicialmente fueron grandes trituradores giratorios que permitían una gran producción en puestos primarios. Posteriormente se redujo su tamaño para trabajar en puestos secundarios de trituración. Estos equipos de conminución se desarrollaron tecnológicamente para obtener un molino de cono con inversiones iniciales más bajas y unos consumos y desgastes más controlados.

En el sistema de trabajo de los trituradores de cono, la compresión y el cizallamiento son las fuerzas más relevantes, las cuales hacen que estos equipos trabajen de manera continua mediante una sucesión ininterrumpida de acciones alternadas de presión y expansión.

7. Datos de partida

7.1 Clasificación de los áridos

7.1.1 Procedencia

Uno de los aspectos más importantes es la procedencia del material que se va a machacar. Se pueden clasificar de la siguiente manera [5]:

- Áridos naturales: Se obtienen sin la adición de otros elementos. Se pueden clasificar en:
 - Áridos granulares: Se producen en graveras. Una vez extraídos, se lleva a cabo un proceso de lavado y clasificación. El tamaño es de 400 milímetros aproximadamente
 - Áridos de machaqueo: Se producen en canteras. Se extraen mediante voladura y sufren un proceso de trituración, molienda y clasificación del material según la aplicación. El tamaño aproximado de los minerales extraídos es de unos 800-1000 milímetros.
- Áridos artificiales: Sufren una serie de procesos industriales, en los que se emplean cenizas de la combustión del carbón, escorias siderúrgicas o estériles mineros.
- Áridos reciclados: Proceden de materiales que ya se han empleado anteriormente como derribos de edificaciones o carreteras en desuso.

7.1.2 Forma

La forma es otro de los aspectos clave en los procesos de caracterización, pues afecta a la resistencia mecánica de las partículas, las características petrológicas y factores de producción. Por ejemplo, las partículas redondeadas generarán un hormigón con mayor trabajabilidad, pero con menor adherencia árido-pasta, mientras que las partículas que provienen de la trituración generan un hormigón menos dócil, pero con mayor adherencia entre el árido y la pasta.



Figura2. Tipos de árido [5]

7.1.3 Caras de fractura

Las caras de fractura se deberán tener en cuenta ya que presentan una notable importancia en los áridos, ya que a mayor angulosidad (porcentaje de áridos con dos o más caras de fracturas), mayor resistencia del aglomerado, aumento de la adherencia de las mezclas bituminosas y mayor resistencia del mineral debido al rozamiento interno.

7.1.4 Densidad

Se deberá tener en cuenta además la densidad de los materiales para conocer la carga y la capacidad de trabajo del molino de cono. La legislación vigente establece tres categorías de áridos en función de sus densidades [5]:

- Árido ligero: Árido de origen mineral que después de secado en estufa, tiene una densidad menor o igual a 2000 kg/m^3 o una densidad aparente menor o igual a 1200 kg/m^3 .
- Árido normal: Árido que después de secado en estufa tiene una densidad mayor que 2000 kg/m^3 y menor que 3000 kg/m^3
- Árido pesado: Árido que después de secado en estufa tiene una densidad mayor que 3000 kg/m^3 .

7.1.5 Dureza

Por último, resulta imprescindible conocer la dureza de los áridos que se van a procesar. Se pueden recoger los datos de dureza en las siguientes tablas [5]:

MATERIAL	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (N/mm^2)
Caliza	150
Cuarcita	250
Grava Silíceea	130
Granito	180
Gneis	140
Mármol	110
Esquistos	170

Tabla1. Resistencia a compresión de los minerales [5]

7.2 Fragmentación

La fragmentación de las rocas es un proceso muy importante para la obtención de áridos, ya que ningún mineral se puede emplear tal y como se extrae de las canteras o

graveras. Los principales objetivos de este proceso de fragmentación son los siguientes:

- Obtención de las especies minerales con mayor valor económico.
- Reducción del tamaño del material para la clasificación, transporte y acopio del material.
- Obtención de tamaños que favorezcan las reacciones químicas (lixiviación, flotación, etc.)

A la hora de planificar el proceso de trituración, uno de los aspectos fundamentales es el coeficiente de reducción, que indica la relación de reducción que sufre el material en la salida de los equipos en comparación con la entrada. El coeficiente de reducción se expresa:

$$\text{Factor reducción} = \frac{D_{80}}{d_{80}}$$

Se define como la relación entre la abertura de la malla cuando el 80% del material que entra en la criba atraviesa dicha malla y la abertura de la malla que permite el paso del 80% del producto final. Es muy relevante tener en cuenta que el porcentaje de finos aumentará en la manera que lo haga el factor de reducción, obteniéndose una menor cantidad de finos en trituraciones sucesivas.

Un proceso de fragmentación puede ser de circuito abierto o circuito cerrado. Si en el proceso el material pasa una única vez por el equipo de trituración nos referiremos a este como circuito abierto. En cambio, si una vez realizada una operación de trituración y cribado el material se redirige a los equipos de conminución, se denominará circuito cerrado.

7.3 Análisis mecánico de las rocas

7.3.1 Introducción

Es muy importante conocer perfectamente el comportamiento que van a tener las rocas a la hora de la elección óptima de la maquinaria que va a formar parte del proceso de producción de una determinada cantera. En el proceso previo al diseño de la planta de producción será necesaria la toma de muestras para someterlas a diferentes ensayos para conocer su funcionamiento mecánico.

7.3.2 Resistencia a la compresión

La resistencia mecánica se define como la capacidad de los cuerpos para resistir las fuerzas aplicadas sin romperse. Esta propiedad mecánica dependerá de la composición química y de su estructura física.

En el caso particular de las rocas, la resistencia a tracción suele ser en torno al 15% de la resistencia a compresión. Es importante conocer la composición mineralógica de las

rocas, ya que la resistencia a compresión va a depender en gran medida de los minerales por los que esté formada.

La metodología de los ensayos triaxiales se recoge en la norma americana ASTM D2664 y D5407 [7]. Para proceder con el ensayo se toma una muestra de rocas contenidas en una membrana de goma colocada en una célula triaxial. Se somete a una presión de entre 5 y 60 MPa que se mantendrá constante durante todo el ensayo. Al finalizar el ensayo se obtendrá la tensión máxima de rotura, el Módulo de Young, Coeficiente de Poisson y velocidad de tensión en función de la deformación axial y radial.

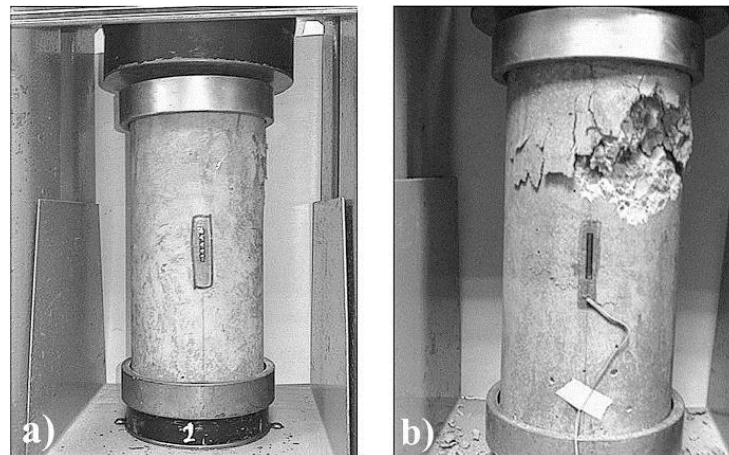


Figura3. Ensayo de resistencia a la compresión [8]

7.3.3 Resistencia al impacto, desgaste y fragmentación

Son numerosos los ensayos empleados para la medición de la resistencia de las rocas. Uno de los ensayos más realizados es el de fragmentación dinámica, en el que se obtiene la resistencia del material contra el impacto. Dicho ensayo se recoge en la norma francesa NF P 18-574.

Otro de los ensayos fundamentales es Ensayo Los Ángeles [7] en el que se mide la resistencia a la fragmentación. El procedimiento normalizado es el siguiente: Se introduce la muestra de árido en un tambor giratorio que se voltea junto con bolas de acero. El cilindro rotará un número de vueltas a una velocidad fijadas. Después de realizar el volteo, se determina el material que ha retenido el tamiz de ensayo de apertura de 1,6mm. La masa de la muestra del ensayo deberá ser al menos de 15 kg con una fracción granulométrica comprendida entre 10 mm y 14mm. Se deberá tener en cuenta, además, que la muestra de ensayo debe cumplir uno de los dos requisitos siguientes:

- Entre el 60% y el 70% del árido deberá pasar por el tamiz de 12,5mm.
- Entre el 30% y el 40% del árido deberá pasar por el tamiz de 11,2mm.

La muestra que se quiere ensayar deberá tener una masa de 5000 g +-5g se lavará y secará en estufa a una temperatura de 110 grados centígrados. Posteriormente se dejará enfriar a temperatura ambiente.

Para proceder con el ensayo se introducen en el tambor 11 bolas esféricas de acero con un diámetro comprendido entre 45 y 49 mm con una masa de entre 400 y 445g. Posteriormente se realiza el volteo del tambor con la muestra de árido a ensayar y las bolas de acero mencionadas con anterioridad a una velocidad de entre 31 y 33 rpm hasta completar 500 vueltas. Después de la operación de volteo se extraerá el material separando la fracción que pasa por el tamiz de 1,6 mm, se lavará y secará en una estufa a 110 grados centígrados. El resultado del ensayo obtenido es el porcentaje en masa de la muestra ensayada que ha pasado el tamiz al finalizar el ensayo con respecto a la masa inicial.

7.3.4 Índice de Bond

El índice de Bond [7] o índice de trabajo mide el consumo energético específico (kWh/t) que se necesita para reducir el material desde un tamaño suficientemente grande (prácticamente infinito) hasta un tamaño de 100 micras.

El método de Bond permite la estimación del consumo de energía con un error promedio del 20%. Es por ello que dicho método es el habitual para el dimensionamiento de estructuras. Es por lo tanto, la teoría que más se ajusta a los casos reales y afirma que la energía necesaria para una determinada reducción de tamaño es proporcional a la nueva longitud de fisura creada. Se expresa de la siguiente manera:

$$W = 10 * W_i * \left(\frac{1}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}}} \right)$$

Donde:

- W es el consumo energético (KWh/t).
- d_{80} es el tamaño de la malla por el que pasa el 80% del producto (mm).
- D_{80} es el tamaño de la malla por el que pasa el 80% de la alimentación (mm).
- W_i indica la resistencia que ofrece cada material al ser triturado. Depende de su naturaleza.

7.3.5 Índice de Abrasión

En España, el ensayo del índice de abrasión se realiza bajo la norma EN 1097-8 [7]. Para proceder con dicho ensayo se coloca una muestra de árido sobre una capa de resina de poliéster y se apoya en una pista giratoria. Además, se añade arena de tipo Leighton Buzzard para incrementar el desgaste.

Después de 500 giros a una velocidad de entre 28 y 31 rpm se determina el valor de la abrasión, calculando la diferencia de peso entre el peso inicial de la muestra y el final.



Figura4. Equipo para determinar el índice de abrasión

7.3.6 Triturabilidad

El objetivo del ensayo para determinar el índice de triturabilidad es la evaluación de las propiedades mecánicas de los áridos, identificando la resistencia de estos a triturarse debido a la acción de una carga. Para llevar el ensayo a cabo se procede de la siguiente manera: Se parte de la colocación de una muestra en un cilindro de acero aplicando sobre ella una fuerza de compresión que ejerce un cilindro hidráulico. Como resultado de este esfuerzo generado por la prensa, la muestra tiene a triturarse modificando su composición granulométrica. Posteriormente, se podrá calcular un índice relativo al peso de la muestra inicial.

Tipo de hormigón	Índice de triturabilidad, %	
	Áridos secos	Áridos húmedos o saturados
Pavimentos de hormigón para tráfico pesado u hormigones con resistencia característica ≥ 35 MPa	Menos de 15	Menos de 25
Pavimentos y pisos sometidos a desgaste y hormigones arquitectónicos expuestos a diferentes tipos de erosión	De 20 a 15	De 35 a 25
Otros tipos de hormigones con resistencia característica ≤ 35 MPa	De 35 a 20	De 50 a 35

Figura5. Valores límite del índice de triturabilidad en los áridos para hormigones [7]

7.3.7 Humedad

La humedad se expresa como el contenido de agua presente en la muestra del árido. Para determinarla, se relaciona el contenido de agua del árido, en porcentaje, con respecto a la masa seca después de calentar la muestra de árido en estufa a 110 grados centígrados para la eliminación del resto de agua. Dependiendo del ambiente en el que se encuentren o se almacenen los áridos, el porcentaje de humedad será uno u otro.

Es importante conocer el porcentaje de humedad que presenta una pieza, ya que, dependiendo de este porcentaje, que un alto contenido en humedad provocará un alto valor del nivel de abrasividad de una determinada roca. La humedad provoca que las partículas finas se adhieran a las partículas más gruesas.

Generalmente, no se suele trabajar con alimentaciones que superen el 9% de humedad, intentando reducir dicho valor todo lo posible.

7.3.8 Análisis granulométrico

En el análisis granulométrico [8] se busca conocer la distribución de tamaños de las partículas que forman parte de una muestra de áridos, separándolas según su dimensión mediante una serie de tamices dispuestos de mayor a menor abertura de malla.



Figura6. Material para el análisis granulométrico

El ensayo se especifica en la norma UNE-EN 933-1. Consiste en separar la muestra de áridos mediante una serie de tamices en varias fracciones granulométricas e tamaño mayor a menor. Para proceder con el ensayo, se lava el árido y se tamiza en vía seca.

La masa de las partículas retenidas en cada uno de los tamices empleados en la separación se expresa en función de la masa inicial. Posteriormente, los datos obtenidos se registran en una gráfica semilogarítmica con el porcentaje del material que pasa por cada tamiz en escala normal y los tamaños de tamices en escala logarítmica.

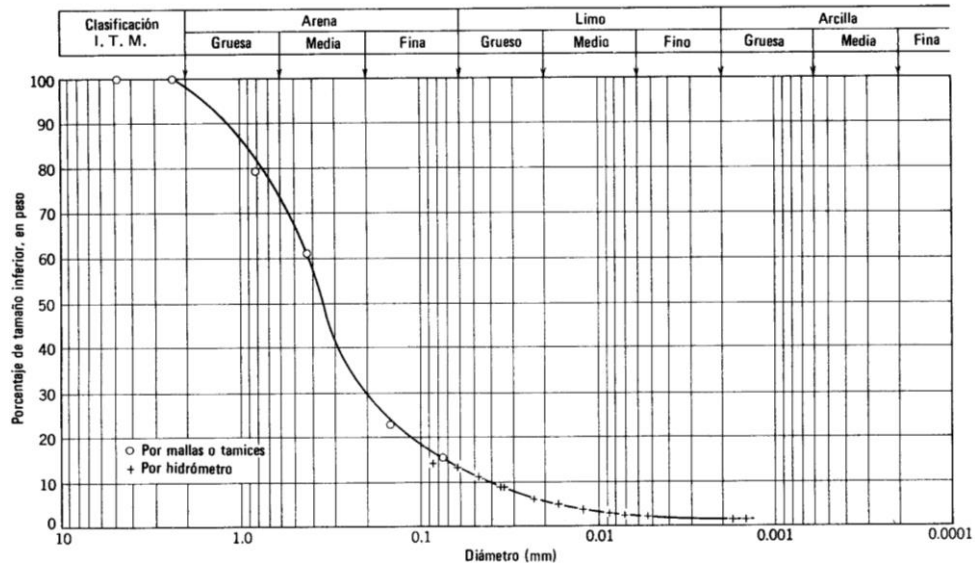


Figura7. Grafica granulométrica [8]

7.4 Plantas fijas para el tratamiento de áridos naturales

7.4.1 Introducción

En las plantas de tratamiento de áridos se procesan los minerales que provienen de las canteras y graveras.

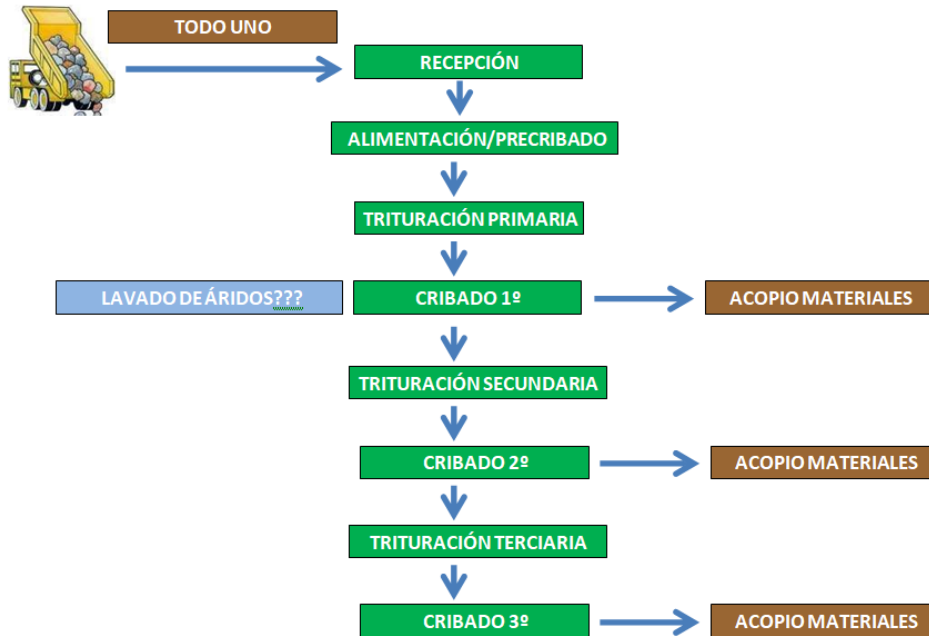


Figura8. Esquema de funcionamiento de una cantera

Estos áridos sufren una serie de procesos de transformación para la obtención de diferentes fracciones granulométricas en función de la demanda y del sector al que se le suministre la materia.

El proceso de tratamiento de los áridos naturales en una planta fija pasa por tres fases de triturración para la reducción del tamaño de estos. La triturración primaria, secundaria y terciaria. De esta manera, se permite disminuir en las sucesivas fases, el tamaño de las partículas, empleando equipos de triturración de diferentes características para cada una de estas fases. El número de etapas de triturración necesarias para obtener el producto final dependerá del factor de reducción.

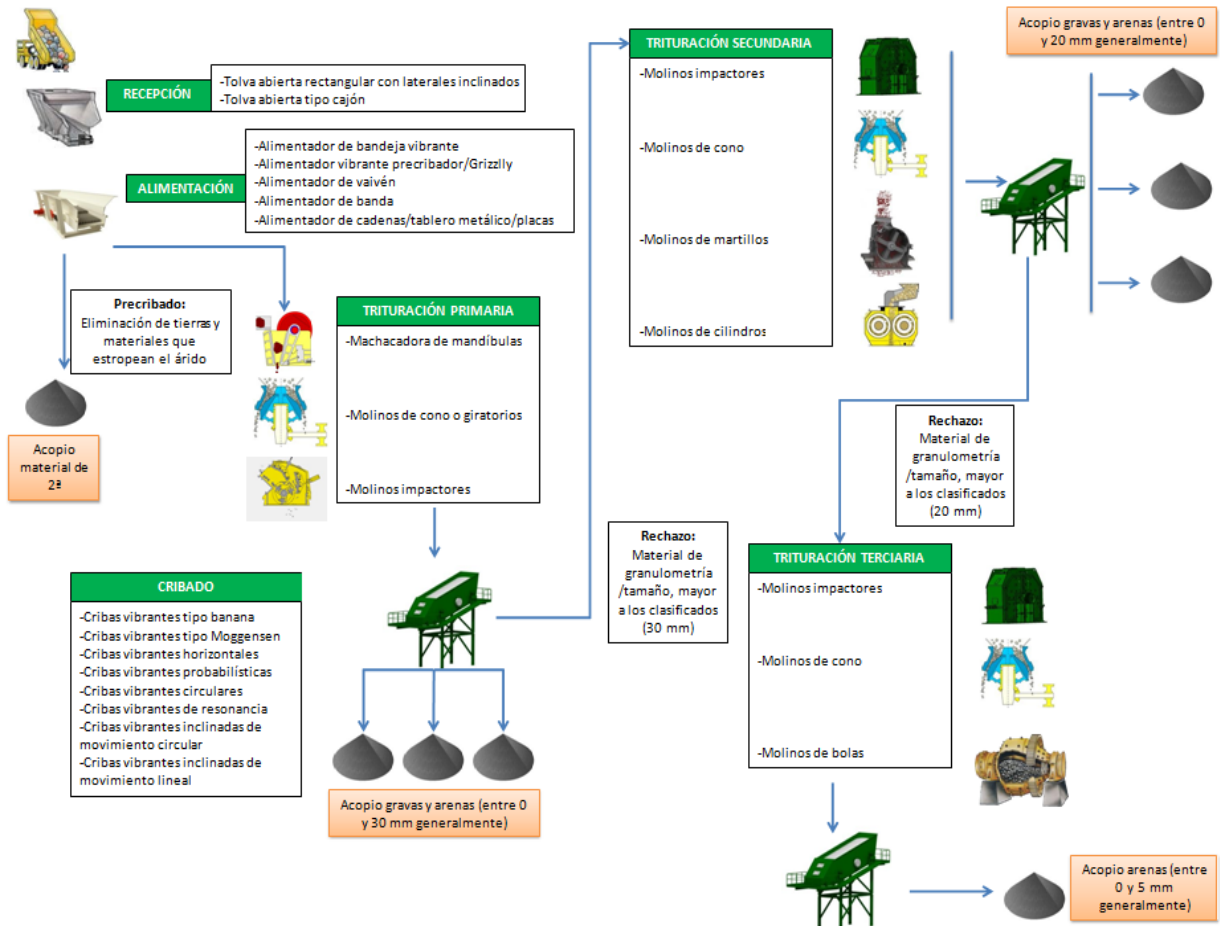


Figura9. Equipos de procesamiento de áridos de una cantera

Los criterios que se deberán seguir para la selección de los equipos que va a constituir la línea de la cantera son la alimentación de la planta, las reservas minerales, flexibilidad y versatilidad, calidad final del mineral, adecuación medioambiental, etc.

7.4.2 Alimentación

La función de los alimentadores es la recepción del material que previamente se ha depositado en la tolva e introducción de este en la línea de la cantera. Estos dispositivos son fundamentales para alimentar el proceso con un flujo uniforme y regulado. La continuidad del flujo de material es requisito indispensable ya que si se alimenta un molino con flujo discontinuo el material obtenido perderá calidad y el riesgo de avería aumenta.

Generalmente todos los alimentadores suelen llevar algún tipo de tajadera para la regulación del material que sale por ellos. Además, los motores que los alimentan cuentan con variadores de velocidad para regular la velocidad de alimentación.

Se pueden clasificar en alimentadores vibrantes, alimentadores de banda, alimentadores de tablero metálico o alimentadores de vaivén.



Figura10. Alimentador de áridos

7.4.3 La trituración

El proceso de trituración se basa en la reducción del tamaño de los materiales que se obtienen en las canteras y graveras mediante distintas etapas y maquinaria en función del puesto que ocupen en la línea de producción y los mecanismos de rotura empleados. Los equipos de trituración se pueden clasificar según el mecanismo de rotura de la siguiente manera:

- Trituradora de mandíbulas: Se emplea en puestos primarios en dónde se requiere una trituración gruesa y media. El tamaño de alimentación máximo es de 1200 mm con un peso de 3000 Kg. Presenta un factor de reducción de hasta 1:10.

Su funcionamiento se basa en la rotación de un eje excéntrico impulsado por un motor eléctrico que hace que la mandíbula móvil se acerque y se aleje periódicamente de la mandíbula fija.

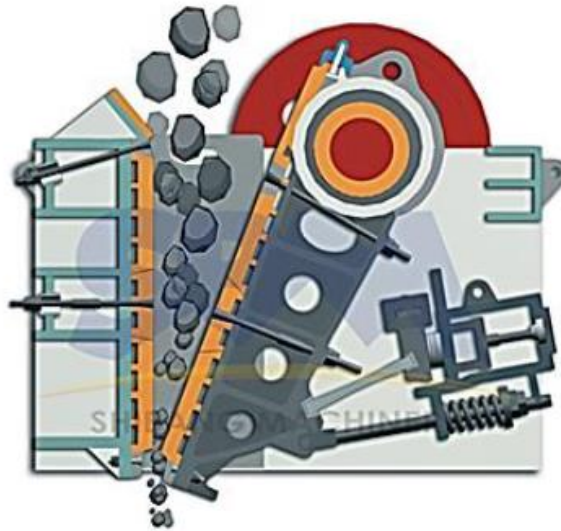


Figura11. Trituradora de mandíbulas

- Trituradora giratoria o de cono: Los trituradores de cono son equipos de conminución que se emplean principalmente en puestos secundarios y terciarios de las explotaciones de áridos. El tamaño de alimentación máximo es de 300mm. El coeficiente de reducción está entre 4:1 y 6:1. En función del reglaje de la cámara, se obtienen producciones entre las 25 y las 1800 toneladas/hora.

Su funcionamiento se basa en la rotación de un eje excéntrico que es impulsado por un motor eléctrico a través de un sistema de transmisión de potencia de engranajes. De esta manera, la cámara cónica interior se acerca y aleja cíclicamente de la cámara exterior, produciéndose la trituración del material.

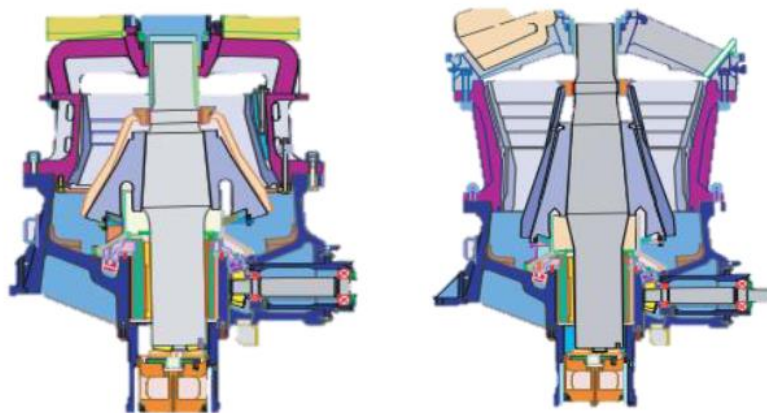


Figura12. Trituradora giratoria

- Trituradora de impacto: Las trituradoras de impacto, también conocidos como molinos de impacto o de percusión, están constituidas por un rotor horizontal o vertical cuya misión es la fractura de la piedra que se introduce en la cámara. Son los equipos más vendidos en la actualidad, abarcando entre el 70% y 80% de las máquinas de trituración.

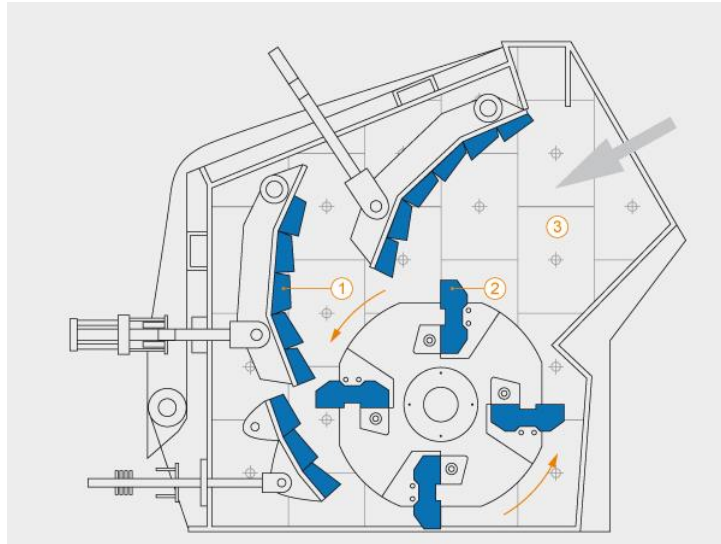


Figura13. Molino impactor

7.4.4 Lavado

El objetivo del lavado de los áridos es la eliminación de las posibles impurezas que pueda tener el material, como lodos o arcillas, que pueden disminuir la calidad y propiedades de los áridos. Es muy frecuente la utilización de trómeles de lavado. En estos dispositivos, el proceso de lavado se realiza en el interior del tambor, debido a la acción de las palas que remueven el material junto con agua. El mantenimiento que precisa este tipo de maquinaria es muy bajo, llegando incluso a los 9 o 10 años sin ningún tipo de coste de mantenimiento. La producción que se puede conseguir oscila entre las 50 y 450 toneladas en función del diámetro y longitud del trómel.

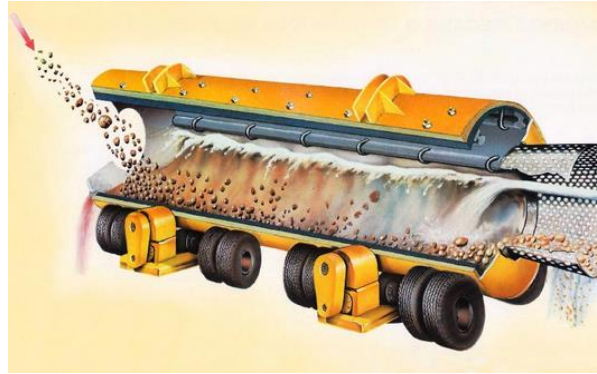


Figura14. Tromel de lavado de áridos

7.4.5 Clasificación

El proceso de clasificación consiste en la separación de los áridos que proceden de la tritución. En esta fase, los materiales se recirculan al proceso de tritución primaria, se llevan a un proceso de tritución secundaria o se realizan acopios de materiales ya listos para ser comercializados a las diferentes industrias que los requieran. La clasificación de los áridos se realiza con unos equipos denominados cribas. Están formadas por una serie de chapas plegadas y perfiles laminados que confieren la estructura. El proceso de cribado se realiza por la acción de las mallas que dejarán pasar los áridos en función del tamaño que tengan.

Hay una gran variedad de cribas en el mercado en función de diferentes tipos de clasificado, materiales, etc. Podemos clasificarlas en cribas vibrantes y no vibrantes. Las cribas vibrantes, son máquinas accionadas por un motor eléctrico en las que hay un sistema vibrante (eje o motovibradores) formado por contrapesos excéntricos, que al girar provocan la vibración de la máquina, facilitando el clasificado de materiales.

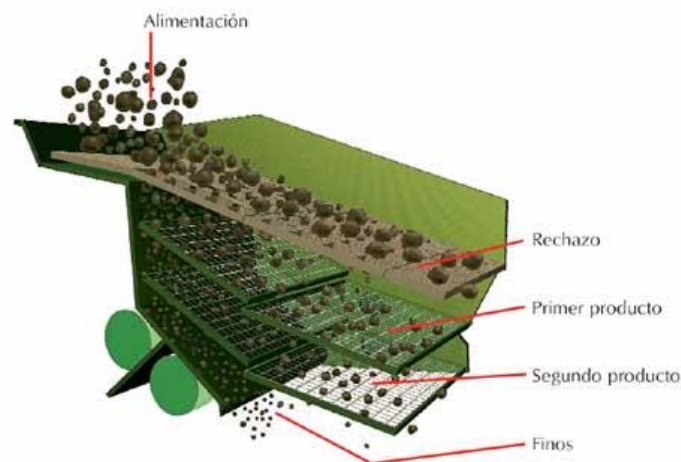


Figura15. Criba de áridos

7.4.6 Transporte

En las situaciones que se necesite llevar el material de un puesto a otro de la explotación se utilizarán cintas transportadoras, tanto para trasladar los áridos como para elevarlos a la altura óptima de trabajo. En ocasiones, el espacio disponible en la cantera es un factor determinante a la hora de emplear estos dispositivos, que realizarán a la vez el papel de transporte y alimentación.



Figura16. Cintas transportadoras de áridos en una cantera

7.5 Especificaciones técnicas del molino de cono

7.5.1 Funcionamiento

En este tipo de equipos de trituración se emplean principalmente esfuerzos de compresión. El material se fragmenta mediante un dispositivo troncocónico que gira en un eje excéntrico, en el interior de una estructura troncocónica invertida que tiene la función de cámara de compresión.

El movimiento puede describirse con una función cíclica del eje excéntrico. La distancia entre la salida de la campana y la cámara exterior en su posición más cerrada se designa como CSS (Close Shide Setting), y la posición que ofrece una mayor apertura entre la salida de la campana y la cámara exterior se denomina OSS (Open Shide Setting.)

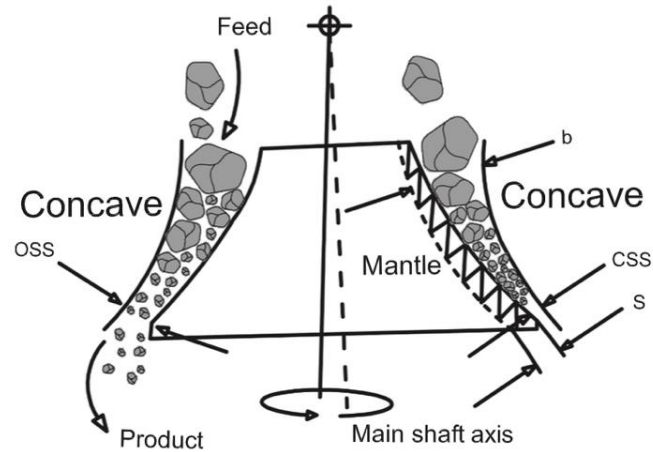


Figura 17. Esquema de funcionamiento de un molino de cono en corte transversal [2]

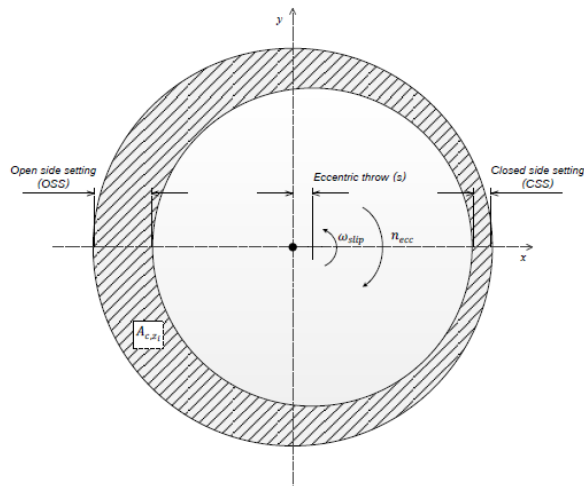


Figura 18. Esquema de funcionamiento de un molino de cono en planta [2]

El componente que realiza el giro se denomina campana, y lo hace alrededor de un eje cuyo pivote se encuentra situado en la parte superior del eje. La estructura troncocónica se encuentra fija en su eje y no se desplaza. De esta manera, la campana se acerca y se aleja sucesivamente a la cámara de compresión. Este movimiento pendular permite la entrada de material al mismo tiempo que comprime el material que ya ha entrado previamente en la cámara de trituración. Al alejarse el cono de la pared, el material triturado queda liberado y cae a través de la cámara por gravedad.

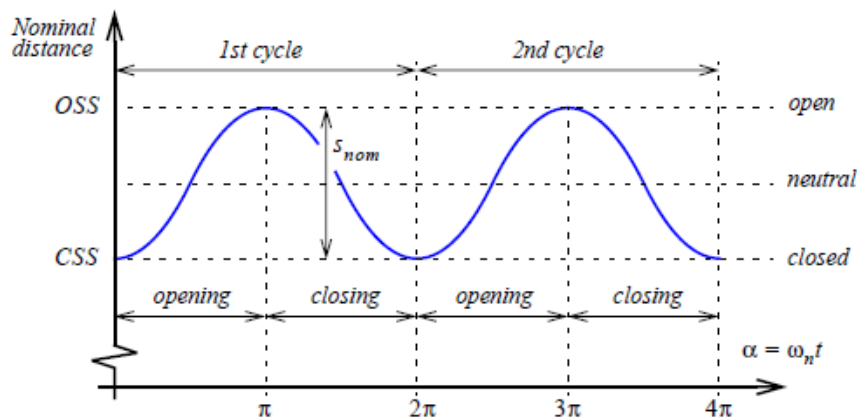


Figura19. Distancia nominal del reglaje en función del tiempo [2]

En la siguiente imagen se puede apreciar el ensamblaje completo de un molino de cono para trituración secundaria. La imagen pertenece a la empresa Roc Impact. Si bien es cierto que todos los molinos de cono están basados en el mismo sistema de trituración de giro de eje excéntrico, cada fabricante desarrolla su propio equipo de trituración en función de las especificaciones y sistemas auxiliares que estime oportuno. Por lo tanto, existen varios modelos de trituradores de cono en el mercado. En nuestro caso, el objetivo es mantener la cámara exterior fija a la estructura del molino, y mediante un sistema de transmisión de potencia conseguir el giro excéntrico del eje vertical del molino, que transmitirá el giro a la cámara interior. De esta manera, se conseguirá transmitir una velocidad lineal de 0,5 m/s [2] a la cámara interior como consecuencia de la velocidad de giro del motor eléctrico.

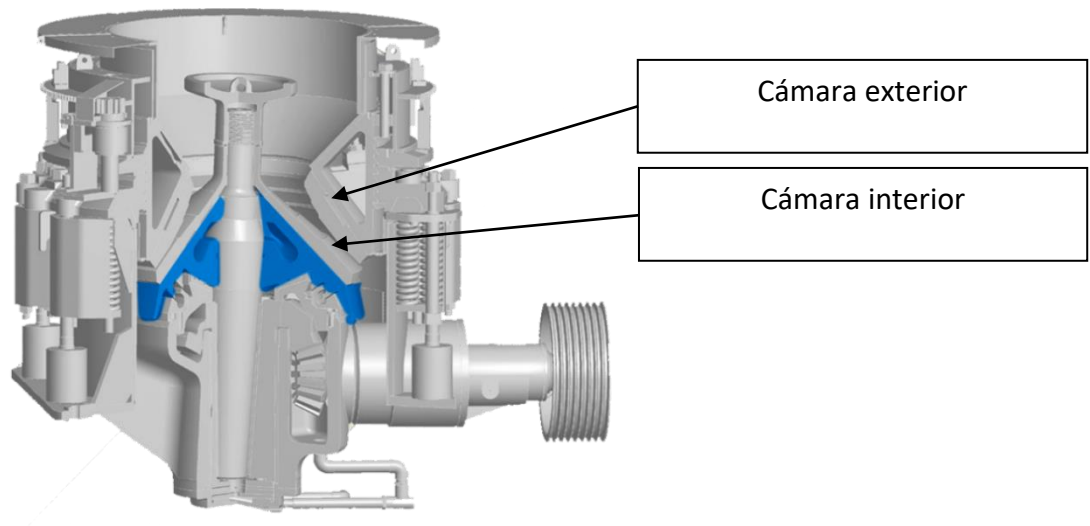


Figura20. Corte transversal de un molino de cono [9]

8. Cálculo y análisis de los componentes

8.1 Cálculos mediante Manual de Resistencia de Materiales

8.1.1 Introducción

Se va a realizar el cálculo de las tensiones principales a las que va a estar sometido el material durante el proceso de trituración. Para la realización de dichos cálculos se ha simplificado la geometría y las condiciones de trabajo ya que, si se mantienen los factores reales de trabajo, el cálculo de las tensiones principales resultaría imposible. En el siguiente punto, donde se calculan las tensiones y desplazamientos por el método de los elementos finitos, se han considerado todos los factores que afectan a las condiciones de trabajo y se ha exportado la geometría real de los elementos que se quieren estudiar.

Para el cálculo de las tensiones principales se utilizan las fórmulas de un cilindro de paredes gruesas sometido a una presión exterior para la campana interior, y una presión interior para la campana exterior. Las dimensiones de los conos exterior e interior se han tomado del modelo simplificado realizado en SolidWorks. Es importante destacar las medidas A, B y C que van a depender del giro del motor y la excentricidad de 3 grados existente entre el eje de rotación y el de la campana interior. Estas medidas dependen del giro que realiza la campana interior, y por lo tanto irán cambiando en función del tiempo. Según el tamaño de material que se quiera obtener, se ajusta el reglaje C del molino de cono. En el molino de cono que se está diseñando, el reglaje C es de 18mm, y las dimensiones de entrada de material A y B varían desde los 117 hasta los 133mm.

La figura 21 se corresponde con el plano del ensamblaje simplificado realizado en SolidWorks. Para realizar los cálculos mediante el manual de resistencia de materiales se han tomado los radios exteriores e interiores de cada una de las cámaras y se han calculado las tensiones en anillos equidistantes. Es muy importante tener en cuenta la distribución de tensiones que hay en la campana, ya que estas van a ser mayores conforme nos acerquemos a la zona de salida del material ya triturado. Esta distribución de tensiones es un factor experimental, que se conoce por las características de funcionamiento del molino de cono. Es por ello por lo que, en la geometría de las campanas de los molinos de cono el espesor de la parte inferior es mayor, proporcionando una mayor resistencia a la deformación y las altas tensiones que deberá soportar.

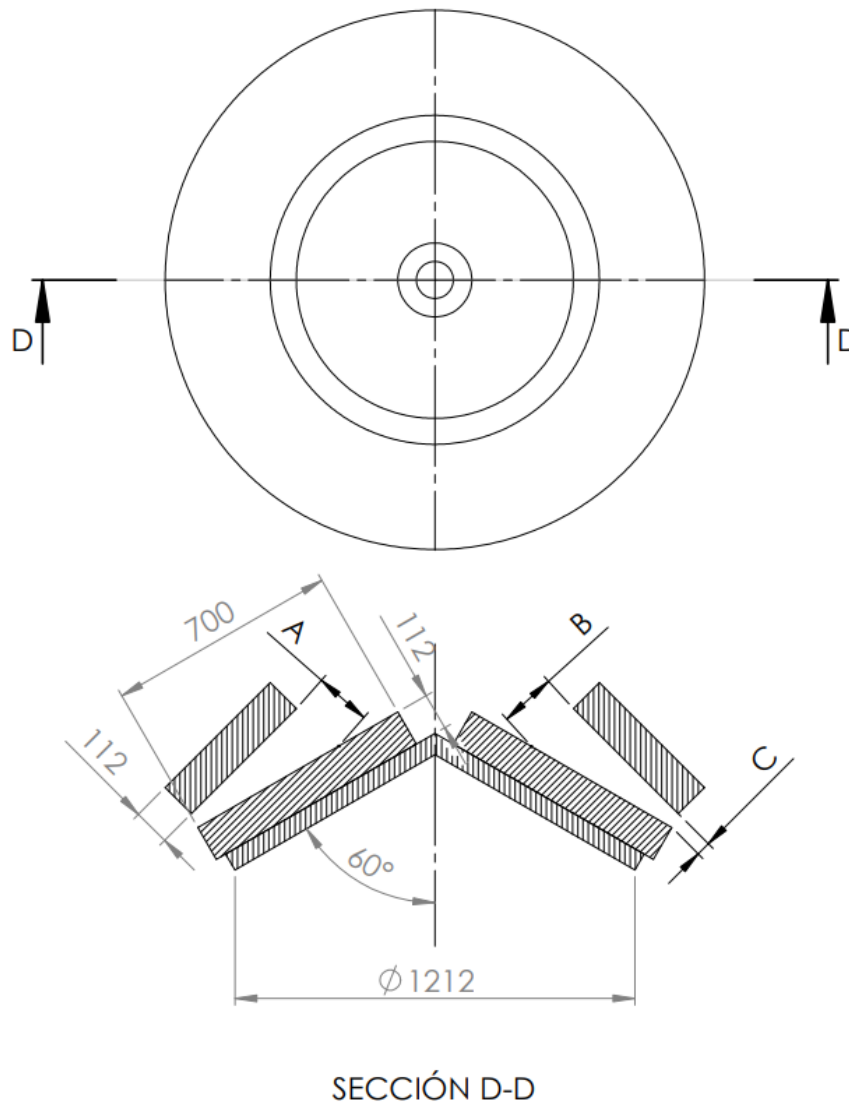


Figura21. Plano del ensamblaje simplificado para cálculos teóricos

Una vez obtenidos todos los radios interiores y exteriores para cada una de las campanas, se procederá con el cálculo de las tensiones principales. La tensión a la que se van a someter los elementos de trituración es de compresión y tiene un valor $2500 \frac{Kg}{cm^2}$. Esta tensión corresponde a los resultados obtenidos en un ensayo a compresión para la cuarcita, que es el material que presenta una mayor resistencia a la compresión.

En la siguiente imagen se puede apreciar las fuerzas radiales y tangenciales a las que estarán sometidas las campanas de trituración. Como se va a exponer a continuación,

la fuerza tangencial va a jugar un papel muy importante a la hora de dimensionar dichos elementos del molino de cono.

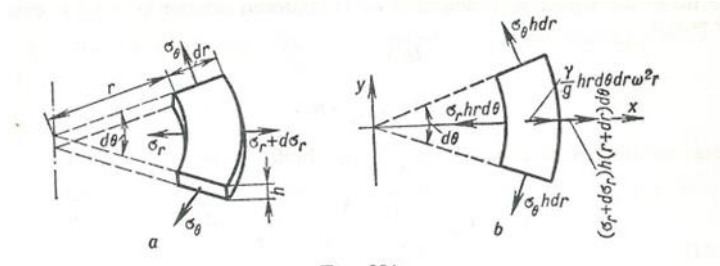


Figura 22. Tensiones principales en un cilindro de pared gruesa [7]

8.1.2 Tensiones principales y desplazamientos en la cámara exterior

Fórmulas de cálculo para cilindros de paredes gruesas Tabla 35

Esquema de sollicitación. Diagramas de las tensiones	Tensiones principales en los puntos de la superficie cilíndrica de radio r	Desplazamiento radial de los puntos de la superficie cilíndrica de radio r	Tensiones principales en el punto peligroso; la tensión equivalente para el punto peligroso ($k = \frac{r_1}{r_2}$)
<p>Cilindro sujeto a la presión interior p</p>	$\sigma_r = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right)$ $\sigma_\theta = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right)$ $\sigma_z = 0, \text{ cilindro abierto}$ $\sigma_z = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2}, \text{ cilindro cerrado}$	<p>Cilindro abierto</p> $u = \frac{pr_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)} \left[(1 - \mu)r + (1 + \mu)\frac{r_2^2}{r} \right]$ <p>Cilindro cerrado</p> $u = \frac{pr_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)} \left[(1 - 2\mu)r + (1 + \mu)\frac{r_2^2}{r} \right]$	$r = r_1$ $\sigma_1 = \sigma_\theta = \frac{1 + k^2}{1 - k^2} p$ $\sigma_2 = \sigma_z = 0, \text{ cilindro abierto}$ $\sigma_2 = \sigma_z = \frac{k^2}{1 - k^2} p, \text{ cilindro cerrado}$ $\sigma_3 = \sigma_r = -p$ $\sigma_{\text{eq III}} = \frac{2p}{1 - k^2};$ $\sigma_{\text{eq M}} = p \left(\frac{1 + k^2}{1 - k^2} + \frac{[\sigma_{-1}]}{[\sigma_{-1}]} \right)$

Figura 23. Fórmulas de cálculo para cilindros de paredes gruesas [7]

Las expresiones para las tensiones principales y desplazamientos para la cámara exterior serán las siguientes:

$$\sigma_r = \frac{pr_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2} \right); \text{ siendo } r = r_1$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{\rho r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2} \right); \text{siendo } r = r_1$$

$$\sigma_z = 0$$

$$u = \frac{\rho r_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)} \left[(1 - \mu)r + (1 + \mu) \frac{r_2^2}{r} \right]; \text{siendo } r = r_1$$

Los datos obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

ESFUERZOS EN LA CÁMARA EXTERIOR							
Área trituration	PRESIÓN(N/m2)	R2(m)	R1(m)	Reglaje(mm)	SIGMA r (MPa)	SIGMA THETA (MPa)	Desplazamiento (mm)
0,16	39302	0,81900	0,45500	51	0,00	0,02	0,000
0,23	245638	0,822	0,485	48	-0,02	0,10	0,001
0,3	1067992	0,82500	0,51500	45	-0,11	0,47	0,007
0,37	3559975	0,828	0,545	42	-0,36	1,65	0,027
0,44	9621553	0,83100	0,57500	39	-0,96	4,75	0,084
0,51	21867167	0,834	0,605	36	-2,19	11,64	0,226
0,58	42876798	0,83700	0,63500	33	-4,29	25,07	0,530
0,65	73925514	0,84	0,665	30	-7,39	48,45	1,112
0,72	113731560	0,84300	0,69500	27	-11,37	85,82	2,127
0,79	157960500	0,846	0,725	24	-15,80	142,28	3,797
0,86	199950000	0,84900	0,75500	21	-20,00	226,73	6,494
0,93	232500000	0,852	0,785	18	-23,25	362,43	11,107
1	250000000	0,85500	0,81500	15	-25,00	640,70	20,956

Tabla2. Tensiones principales y deformaciones en la cámara exterior

Como se ha comentado anteriormente, se ha estimado una distribución de tensiones en base a la experiencia y con el visto bueno del asesor de la empresa. Por lo tanto, para trituration de cada uno de los 13 puntos en los que se realizan los cálculos la tensión va disminuyendo un 7% desde el punto de salida de material hasta el punto de entrada de este. Este decremento se ve reflejado en la columna titulada área de trituration. La presión es función de punto en de la campana en el que nos encontremos, es decir, depende del área de trituration. Así, la presión alcanza un valor máximo de $2500 \frac{Kg}{cm^2}$ en el punto más crítico, y desciende linealmente hasta un valor de $0,340 \frac{Kg}{cm^2}$ en la parte superior del trituration, en el que no se va a producir ningún tipo de esfuerzo de compresión.

Si se analizan las tensiones, se puede apreciar un esfuerzo máximo de compresión en dirección radial de 25 MPa y un esfuerzo máximo de tracción en la dirección tangencial de 640 MPa. A priori, pueden parecer unos esfuerzos demasiado altos, pero se debe tener en cuenta que la resistencia a compresión de la cuarcita es muy alta también. En

el siguiente apartado, en el que se van a calcular las tensiones y desplazamientos mediante el método de los elementos finitos, se confirmarán los resultados obtenidos en el cálculo manual.

Por otro lado, el desplazamiento máximo que podrá darse según los cálculos realizados es de 21mm. Se ha considerado que este desplazamiento está fuera del desplazamiento máximo permitido, que es de 5mm. Por lo tanto, este dato se tendrá muy en cuenta, y en el siguiente apartado de cálculo mediante MEF se explicarán las modificaciones realizadas para reducir este desplazamiento a un valor admisible.

Es muy importante tener en cuenta que tanto en los cálculos manuales, como en los realizados con Ansys, se está aislando a los elementos de trituración y no se está teniendo en cuenta la rigidez que aportarán los demás componentes una vez queden ensamblados en el conjunto que compone la máquina. Por ello, es muy probable que las tensiones y los desplazamientos tengan valores mucho más favorables una vez esté finalizado el diseño. En futuras fases del diseño se realizará un análisis dinámico con todos los componentes ensamblados, obteniéndose de esta manera resultados más precisos. Además, se simulará la entrada de material que se desea triturar utilizando una herramienta de simulación de elementos discretos.

En la siguiente gráfica se muestra la evolución de las tensiones principales frente al reglaje del molino. La tensión tangencial Sigma Theta presenta un crecimiento de tipo exponencial a medida que el reglaje de va disminuyendo. Es importante destacar que dicha tensión tangencial se mantiene con valores muy bajos hasta los 30mm de reglaje, que es la zona en la que se empiezan a dar las tensiones debido a la compresión ejercida para la trituración del árido. En cambio, la tensión radial de compresión sigue una tendencia lineal, aumentando ligeramente su valor cuando el reglaje es de 30mm, y llegando a un valor máximo de 25 MPa.

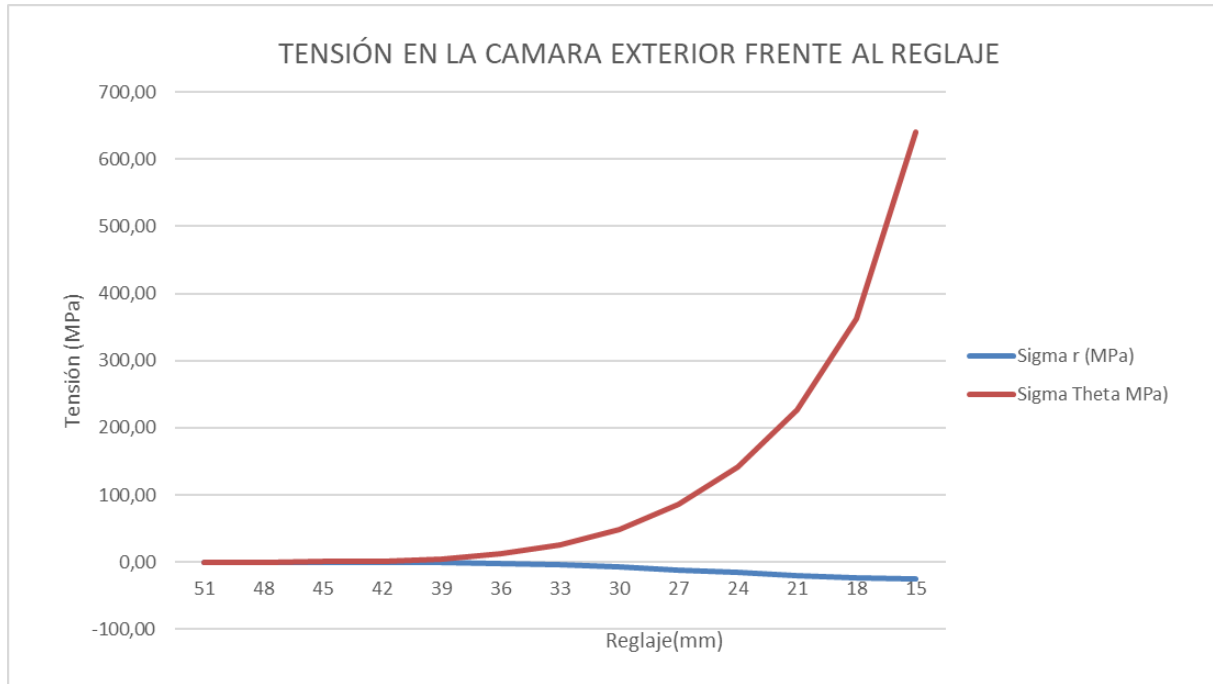


Figura24. Representación gráfica de las tensiones tangenciales y radiales frente al reglaje

8.1.3 Tensiones principales y desplazamientos en la cámara interior

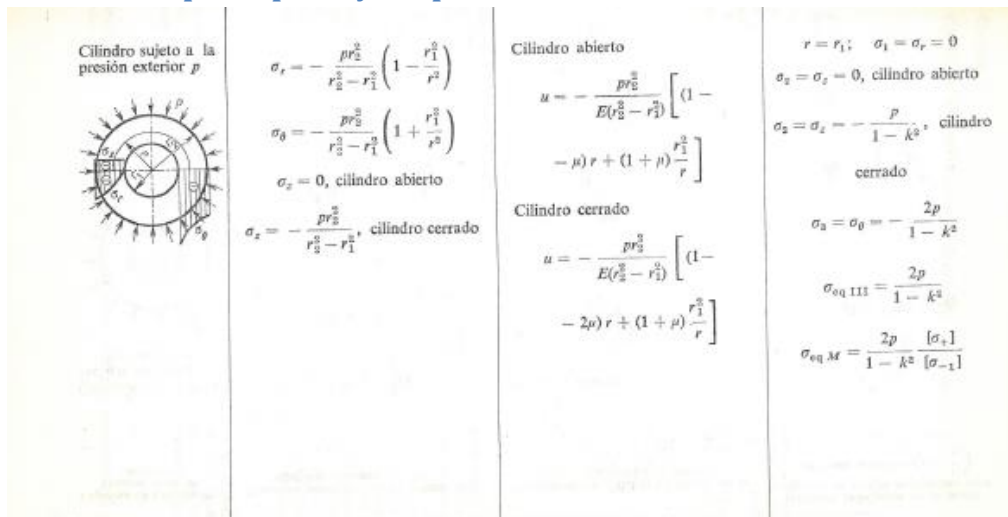


Figura25. Fórmulas de cálculo para cilindros de paredes gruesas [7]

Las tensiones principales y los desplazamientos para la cámara interior son las siguientes:

$$\sigma_r = -\frac{\rho r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2} \right); \text{siendo } r = r_2$$

$$\sigma_\theta = -\frac{\rho r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2} \right); \text{siendo } r = r_2$$

$$\sigma_z = 0$$

$$u = \frac{\rho r_1^2}{E(r_2^2 - r_1^2)} \left[(1 - \mu)r + (1 + \mu) \frac{r_1^2}{r} \right]; \text{siendo } r = r_2$$

ESFUERZOS EN LA CÁMARA INTERIOR							
Área trituration	PRESIÓN(N/m2)	R2(m)	R1(m)	Reglaje(mm)	SIGMA r (MPa)	SIGMA THETA (MPa)	Desplazamiento(mm)
0,16	39302	0,29000	0,23000	51	0	0	0,000
0,23	245638	0,32	0,26	48	0	0	0,002
0,3	1067992	0,35000	0,29000	45	0	-1	0,012
0,37	3559975	0,38	0,32	42	1	-3	0,048
0,44	9621553	0,41000	0,35000	39	1	-8	0,150
0,51	21867167	0,44	0,38	36	3	-20	0,388
0,58	42876798	0,47000	0,41000	33	6	-42	0,860
0,65	73925514	0,5	0,44	30	10	-75	1,665
0,72	113731560	0,53000	0,47000	27	14	-121	2,859
0,79	157960500	0,56	0,5	24	20	-176	4,406
0,86	199950000	0,59000	0,53000	21	25	-232	6,158
0,93	232500000	0,62	0,56	18	28	-281	7,870
1	250000000	0,65000	0,59000	15	30	-314	9,262

Tabla3. Tensiones principales y deformaciones en la cámara interior

Si se analizan las tensiones en la cámara exterior, se puede apreciar un esfuerzo máximo de compresión en dirección radial de 30 MPa y un esfuerzo máximo de compresión en la dirección tangencial de 314 MPa.

Por otro lado, el desplazamiento máximo que podrá darse según los cálculos realizados es de 9,3mm. Se ha considerado que este desplazamiento está fuera del desplazamiento máximo permitido, que es de 5mm. Por lo tanto, y como se ha comentado anteriormente, este dato se tendrá muy en cuenta, y en el siguiente apartado de cálculo mediante MEF se explicarán las modificaciones realizadas para reducir este desplazamiento a un valor admisible.

En la siguiente gráfica se muestra la evolución de las tensiones principales frente al reglaje del molino. La tensión tangencial Sigma Theta presenta un crecimiento en valor absoluto de tipo exponencial a medida que el reglaje de va disminuyendo. Como se ha mencionado anteriormente, es importante destacar que dicha tensión tangencial se mantiene con valores muy bajos hasta los 30mm de reglaje, que es la zona en la que se empiezan a dar las tensiones debido a la compresión ejercida para la trituration del árido. En cambio, la tensión radial de compresión sigue una tendencia lineal, aumentando ligeramente su valor cuando el reglaje es de 30mm, y llegando a un valor máximo de 303 MPa.

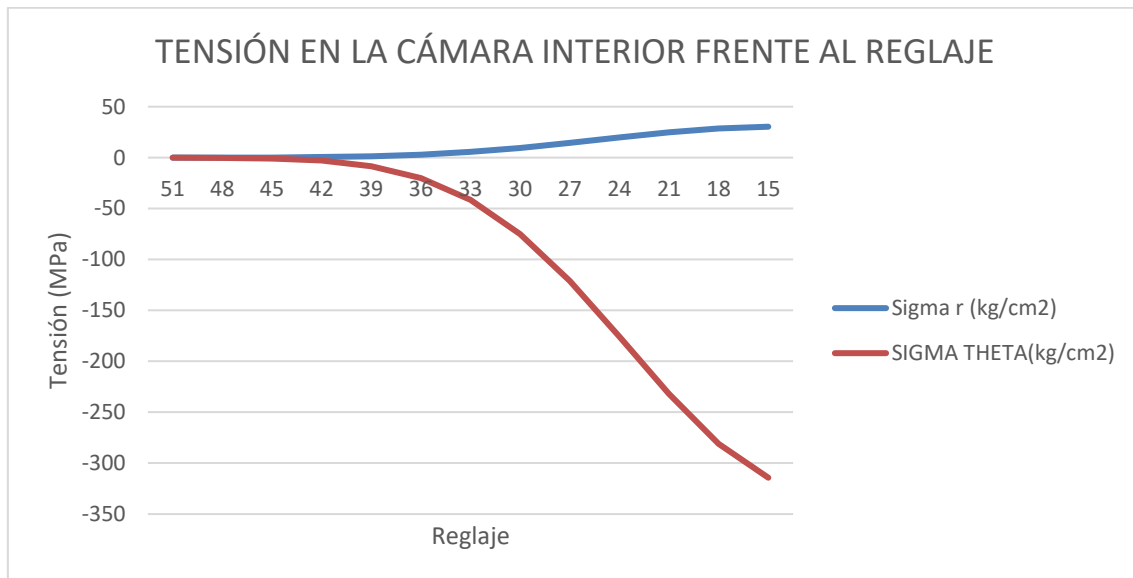


Figura26. Representación gráfica de las tensiones tangenciales y radiales frente al reglaje

8.1.4 Análisis de los resultados. Conclusiones

Se puede apreciar que el esfuerzo tangencial está muy condicionado por el espesor del cilindro en el que se están calculando los esfuerzos. El esfuerzo tangencial siempre será mayor que el esfuerzo radial, por lo que se deberá prestar especial atención a los esfuerzos que se generan en esta dirección. Son estos mismos esfuerzos los que podrán ocasionar daños en el material, y los que van a condicionar su geometría y características de funcionamiento. Los valores máximos obtenidos son de 640 MPa para un esfuerzo a tracción en la campana exterior y de 314 MPa para un esfuerzo de compresión en la campana interior.

En cambio, el esfuerzo radial de compresión máximo que presentan ambas campanas es muy similar, casi sin influencia del espesor. Los valores máximos son de 250MPa para la campana exterior y 303MPa para la campana interior.

8.2 Cálculo mediante elementos finitos

8.2.1 Introducción

En los últimos 50 años, el Método de Elementos Finitos (MEF) se ha convertido en una herramienta muy potente en la resolución de problemas de mecánica de sólidos. El MEF permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico o ingenieril sobre geometrías complicadas. Se van a realizar distintos ensayos de los elementos de trituración para conocer las tensiones y deformaciones generadas durante la trituración, y en función de los datos obtenidos se irá modificando la geometría hasta obtener unas tensiones y deformaciones admisibles para el funcionamiento del molino de cono.

8.2.2 Características del material a ensayar

El proceso de diseño se ha basado propiedades mecánicas de los áridos y en las especificaciones técnicas que deberá cumplir el molino: geometría de los componentes para una trituración eficiente, sistema de alimentación eléctrico, sistema de transmisión de potencia, eje de giro excéntrico, etc. Como se ha mencionado anteriormente, se está realizando la Fase I del proyecto I+D+i propuesto por la empresa, y es muy probable que en un futuro esta geometría sea modificada ligeramente para la implementación de los sistemas que constituyen el molino. Por esta razón, el objetivo principal de esta primera fase del diseño es saber cómo se van a comportar los componentes de la cámara de trituración cuando son sometidos a los esfuerzos de compresión al triturar los áridos debido al giro excéntrico del eje.

Como ya se ha comentado anteriormente, los desplazamientos calculados en el punto anterior de cálculo de las tensiones mediante el manual de resistencia de materiales han resultado estar fuera del límite admisible. Es por ello por lo que, en esta fase del diseño, se ha tenido especial atención a las deformaciones que se pueden ocasionar en los elementos de trituración. Todos los ensayos realizados parecen indicar que, al someter a las cámaras de trituración a los esfuerzos que deberán soportar a compresión para la rotura del material, el mayor problema va a estar muy condicionado por las deformaciones ocasionadas.



Figura27. Deformaciones de la cámara interior [9]

El material empleado para la fabricación de los elementos de trituración es una fundición de acero al manganeso con alta resistencia al desgaste y con elevada dureza y ductilidad. Además, presenta una alta capacidad para resistir el trabajo pesado. A continuación, se muestran las propiedades de distintas fundiciones al manganeso. Para la comprobación de las tensiones generadas por los esfuerzos de compresión al triturar los áridos se compararán con una tensión admisible del material de $45 \frac{kg}{mm^2}$.

	COMPOSICIÓN %								R	f*
	Ct	Cgr	Si	Mn	S	P	Ni	Mo		
A	3,90	—	2,01	0,60	0,08	0,16	—	0,65	30,8	13,3
B	3,07	—	1,26	0,90	0,08	0,15	—	—	33,6	14,7
B**	3,07	—	1,26	0,90	0,08	0,15	—	—	53,5	17,5
C	3,18	0,83	1,34	0,89	0,09	0,11	—	—	38,5	15,4
D	2,91	—	2,28	0,85	0,10	—	0,88	—	39,5	15,4

* A 107 ciclos.
 ** La fundición B*, de igual composición que B, ha sufrido el tratamiento térmico siguiente: calentamiento lento hasta 540°C, después calentamiento rápido a 870°C, temple en aceite a 870°C y revenido a 540°C; las otras fundiciones son brutas de colada.

En los aceros moldeados estudiados por H. F. Moore⁵ (Fig. 158) los valores de $\frac{f}{R}$ son, respectivamente, 0,41, 0,41 y 0,44, para R=58 y R=75 Kg/mm².

Figura28. Tensiones admisibles y límites de fatiga de fundiciones ordinarias y específicas [7]

La figura 29 se corresponde con la campana exterior del sistema de trituración del molino de cono. Este componente quedará fijado a la estructura exterior del molino y va a soportar las tensiones debidas a la trituración del árido.

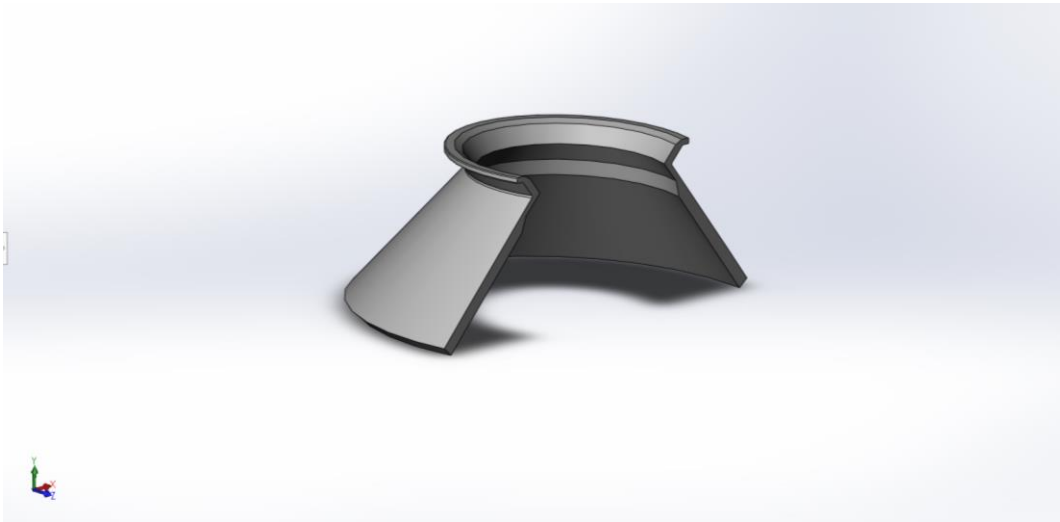


Figura29. Campana exterior

La figura 30 se corresponde con la campana interior de trituración. En este elemento se va a implementar el sistema de transmisión de potencia mediante ruedas dentadas y el eje principal que va a transmitir el giro excéntrico a dicho elemento. Es importante destacar que en la parte inferior el espesor es mayor ya que tiene que soportar esfuerzos mucho mayores en esta zona de trituración del árido. Además, se deberá tener en cuenta la implementación del sistema de asiento de los casquillos interiores y el acoplamiento al eje.

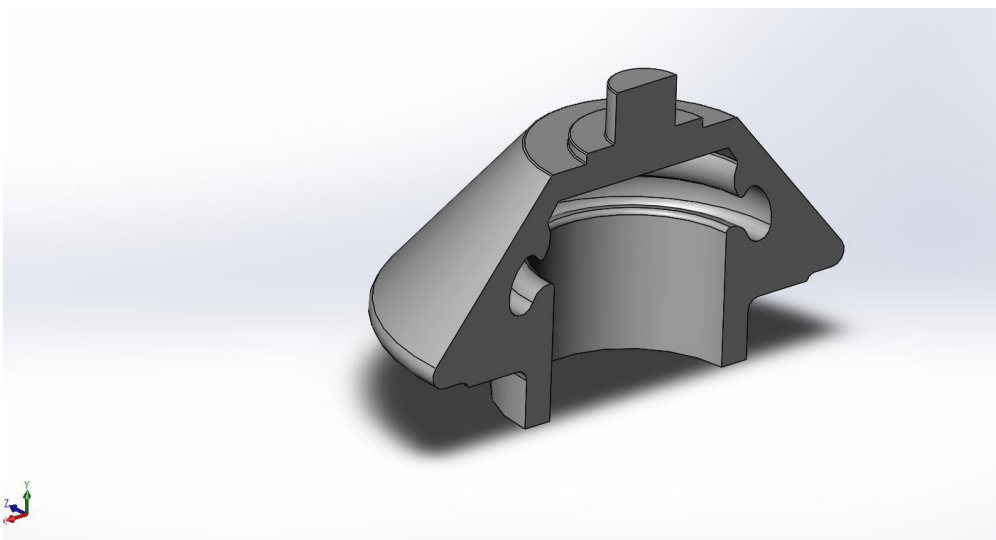


Figura30. Campana interior

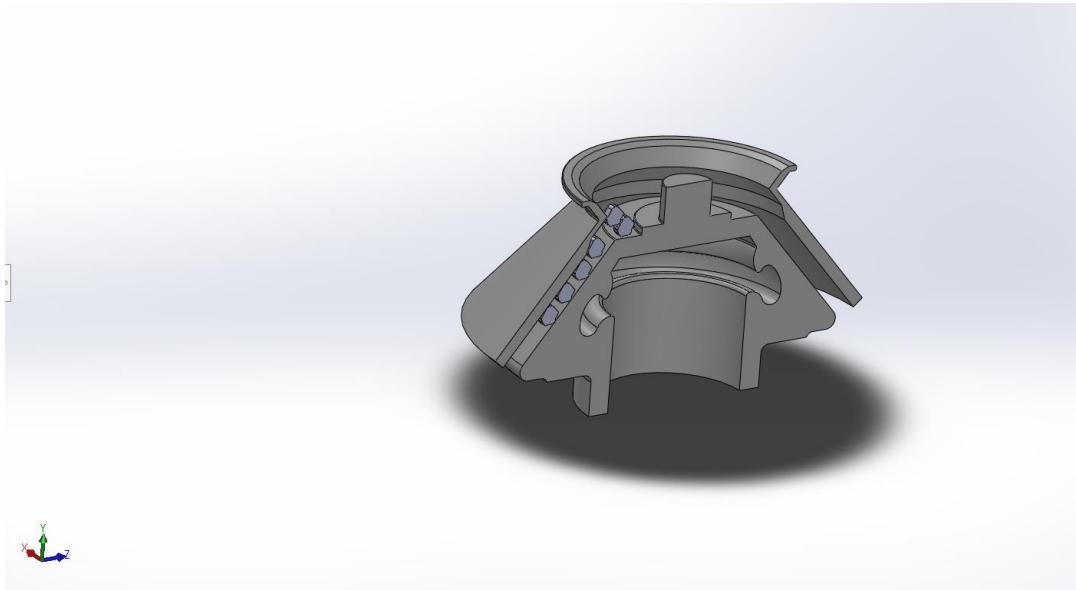


Figura31. Ensamblaje de los componentes de trituración

8.2.2 Resultados obtenidos en la cámara exterior

8.2.2.1 Ensayo I

Para el primer ensayo realizado en Ansys se ha empleado la geometría ya calculada mediante el manual de resistencia de materiales. La intención de este primer ensayo es conocer si las suposiciones realizadas son correctas, y las tensiones y deformaciones calculadas de manera aproximada en el punto anterior se corresponden con las tensiones reales que van a sufrir cuando el molino esté en funcionamiento.

Es importante recalcar que los cálculos realizados son para un instante determinado del ciclo de giro del molino, en el que las dos cámaras se encuentran en la posición límite y el reglaje se corresponde con la mínima abertura de las cámaras de trituración (Close Shide Setting).

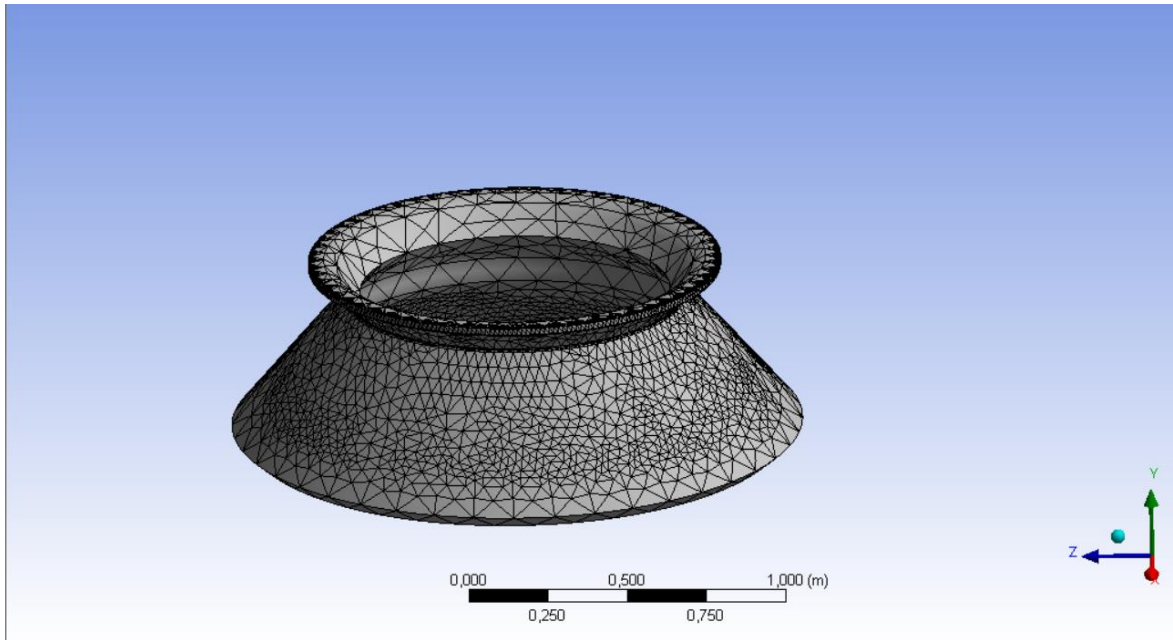


Figura32. Mallado de la campana exterior

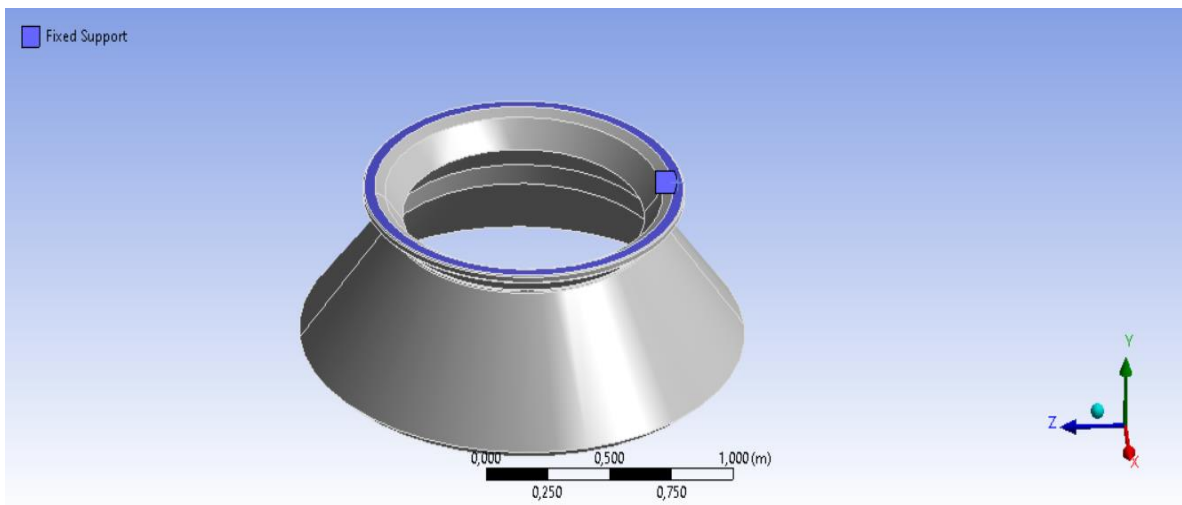


Figura33. Soporte de la campana exterior

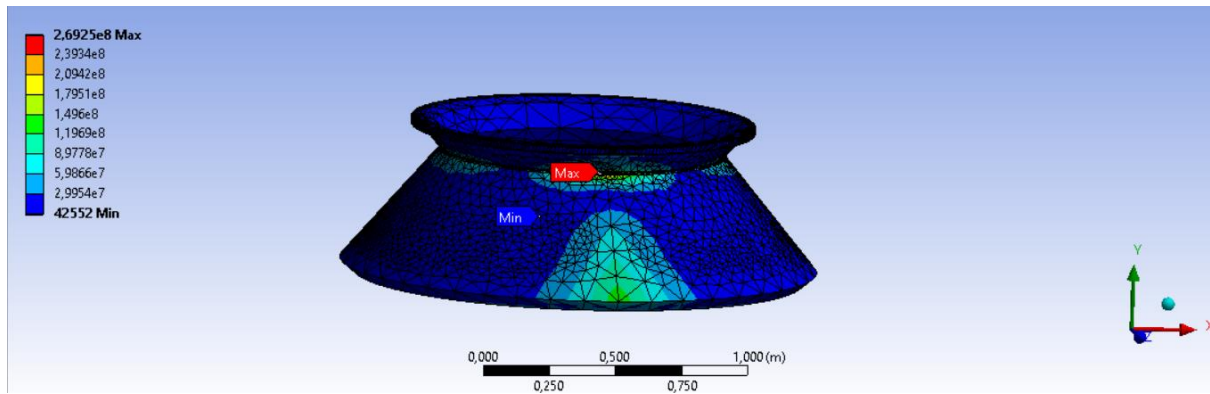


Figura34. Tensiones máximas de von Mises de la cámara exterior calculadas en Ansys

Una vez aplicadas las solicitaciones correspondientes al proceso de trituración se procede a analizar los datos obtenidos mediante el MEF.

La tensión máxima de von Mises obtenida es de 269,2 MPa. Dicha tensión se localiza en la parte superior de la campana exterior, en la zona donde se produce el cambio de espesor y hay un redondeo de la geometría. En el momento del diseño de la geometría, no se tuvo en cuenta el aspecto de concentración de tensiones en la zona donde se está generando este problema. Teniendo en cuenta el valor admisible de la, de 441 MPa, nos encontramos con una tensión admisible con un factor de seguridad de $\frac{441MPa}{269,2MPa} = 1,638$ y por lo tanto el material y geometría son aptos. No obstante, en el siguiente ensayo se ha tenido en cuenta este aspecto de concentración de tensiones y se ha modificado la geometría de la campana exterior para disminuir la tensión generada en esta zona crítica de la geometría.

Se puede apreciar además la distribución de tensiones que se genera en la línea de aplicación de las fuerzas correspondientes a la tensión necesaria para sobrepasar la resistencia del árido, obteniéndose valores de 149 MPa en la zona inferior de la superficie de trituración que aparece en color verde. A medida que se avanza en dirección a la entrada de material, estas tensiones van disminuyendo de manera exponencial, tal y como se había calculado anteriormente mediante el manual de resistencia de materiales hasta llegar a un valor mínimo de 30 MPa justo antes de la zona de concentración de tensiones mencionada anteriormente. La deformación máxima que se genera en la cámara exterior de trituración es de 12,2 mm, y se ubica en la zona donde las solicitaciones debidas al proceso de trituración son mayores. En comparación con el valor obtenido mediante el cálculo realizado en Excel con las expresiones del manual de resistencia de materiales, esta deformación se ha reducido un 58%. Por lo tanto, aunque ambos cálculos están en el mismo orden de magnitud, se tomará como valor de deformación máximo 12,2mm obtenido mediante el cálculo por elementos finitos.

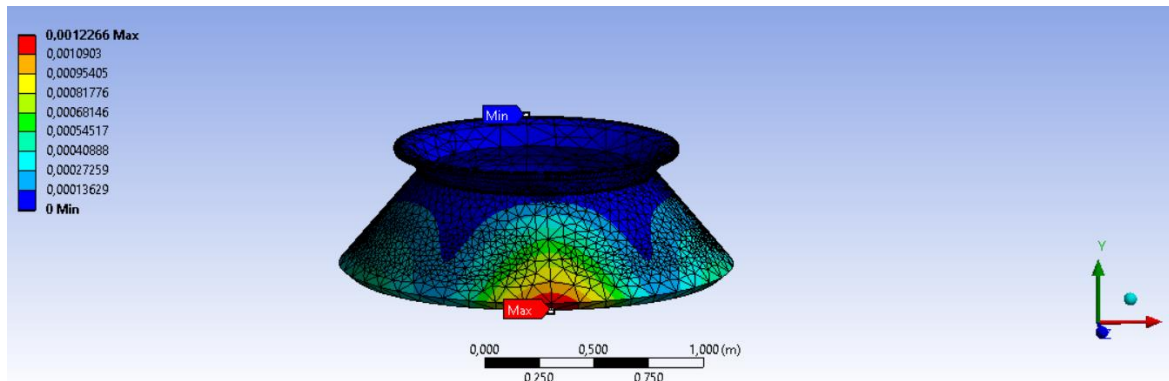


Figura35. Deformaciones máximas de la cámara exterior calculadas en Ansys

La tensión principal máxima tiene un valor de 142 MPa y se ubica en la superficie de tritución dónde las solicitaciones son máximas. Hay una notable diferencia de ubicación de la tensión máxima con respecto a la tensión de von Mises calculada anteriormente. Esta diferencia es consecuencia del valor del cortante empleado en la expresión de la tensión equivalente de von Mises. Aunque la tensión calculada mediante la tensión equivalente de von Mises sea más restrictiva, es importante tener en cuenta ambas tensiones a la hora de redimensionar la geometría de la campana exterior.

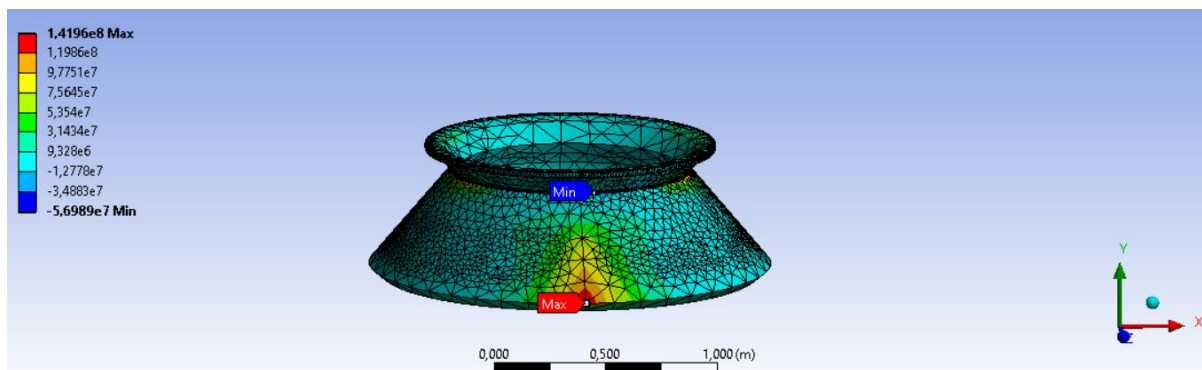


Figura36. Tensiones máximas de la cámara exterior calculadas en Ansys

8.2.2.2 Ensayo II

Para la realización del siguiente ensayo se han realizado 2 pequeñas modificaciones en la geometría de la campana exterior:

1. Aumento del espesor de la zona de tritución de 50mm a 60mm, aportando mayor rigidez y resistencia a la campana.
2. Suavizar el cambio de sección dónde se producía concentración de tensiones.

Después de realizar varias pruebas, se ha obtenido la geometría en la que se han conseguido reducir tanto las tensiones debidas a la zona de concentración de tensiones como las deformaciones. La tensión máxima de von Mises ha pasado de 269,2 MPa a 134,6 MPa, obteniéndose un factor de seguridad de 3,3.

Si se analizan las deformaciones, la reducción ha sido también considerable, pasando de 12,2mm a 8mm. Es muy importante recordar que estas deformaciones están siendo calculadas en unas situaciones muy desfavorables, ya que se están estudiando los elementos de trituración aislados, y en condiciones de funcionamiento esto no va a ser así, si no que el conjunto de componentes aportará una rigidez individual. En posteriores fases del proyecto, con el dimensionamiento del resto de componentes se realizarán ensayos que reproduzcan las condiciones que se dan en un proceso de trituración de áridos.

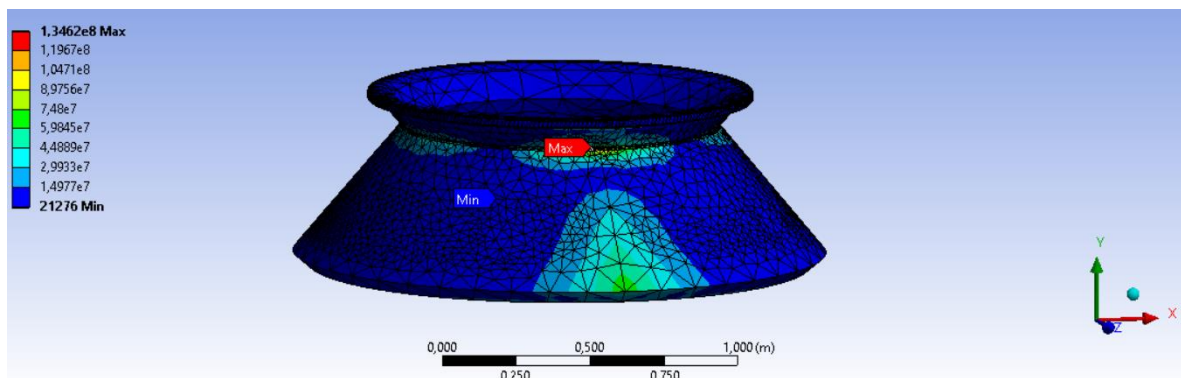


Figura37. Tensiones de von Mises de la cámara exterior calculadas en Ansys

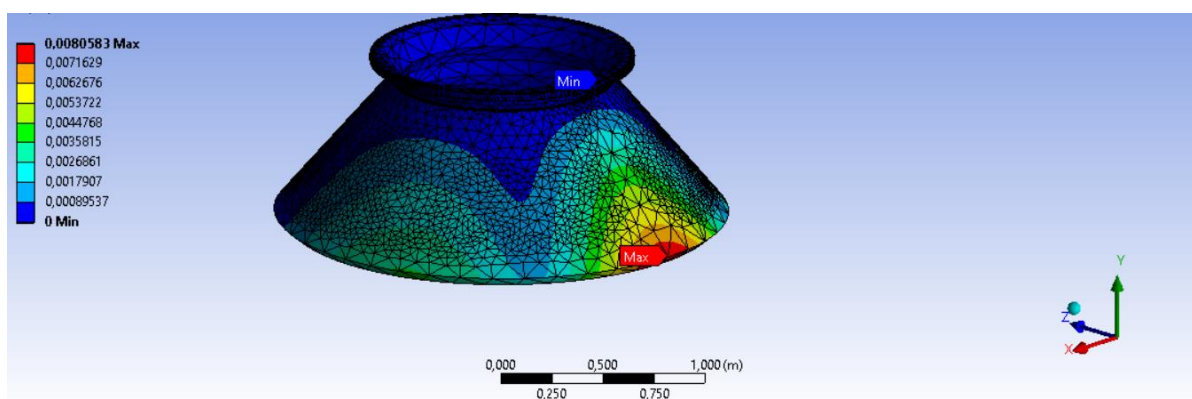


Figura38. Deformaciones de la cámara exterior calculadas en Ansys

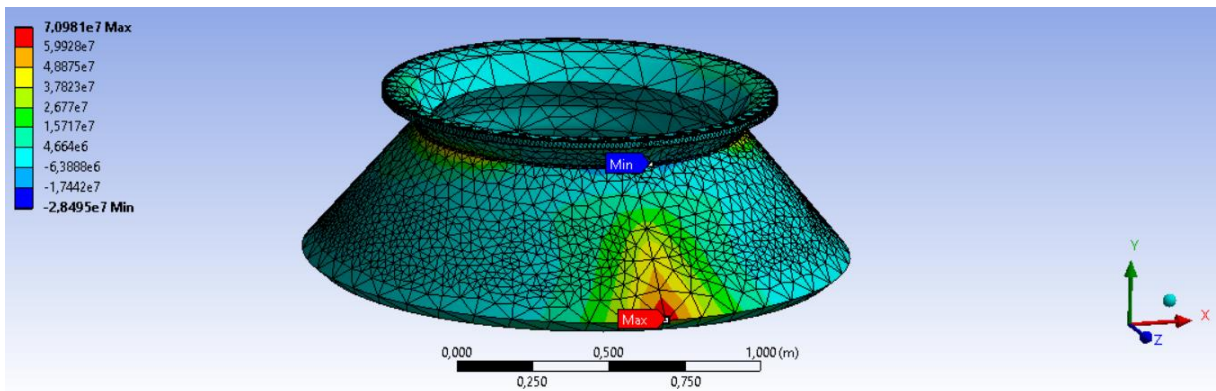


Figura39. Tensión máxima en la cámara exterior calculada en Ansys

8.2.3 Resultados obtenidos en la cámara interior

8.2.3.1 Ensayo I

Se va a proceder con el análisis de los resultados obtenidos para el primer ensayo del segundo de los componentes de trituración, la cámara interior. Como se va a exponer a continuación, la diferencia de geometría con respecto a la cámara exterior va a generar tensiones y deformaciones muy distintas a pesar de intervenir ambas en un proceso de trituración que genera unos esfuerzos de compresión.

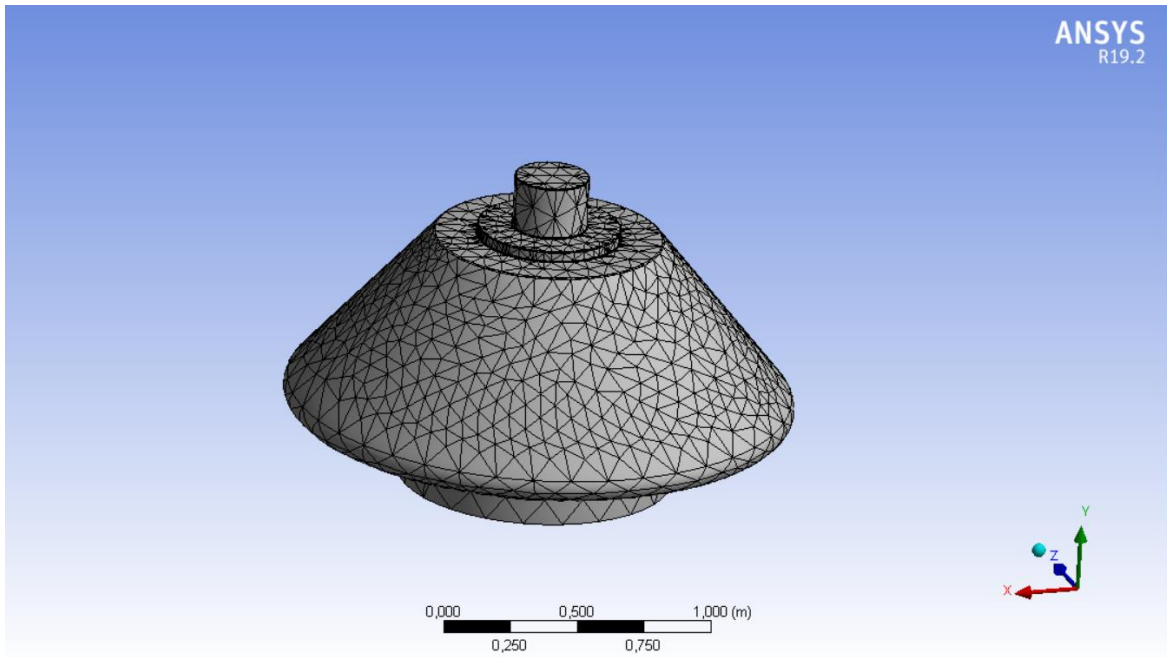


Figura40. Mallado de la cámara interior

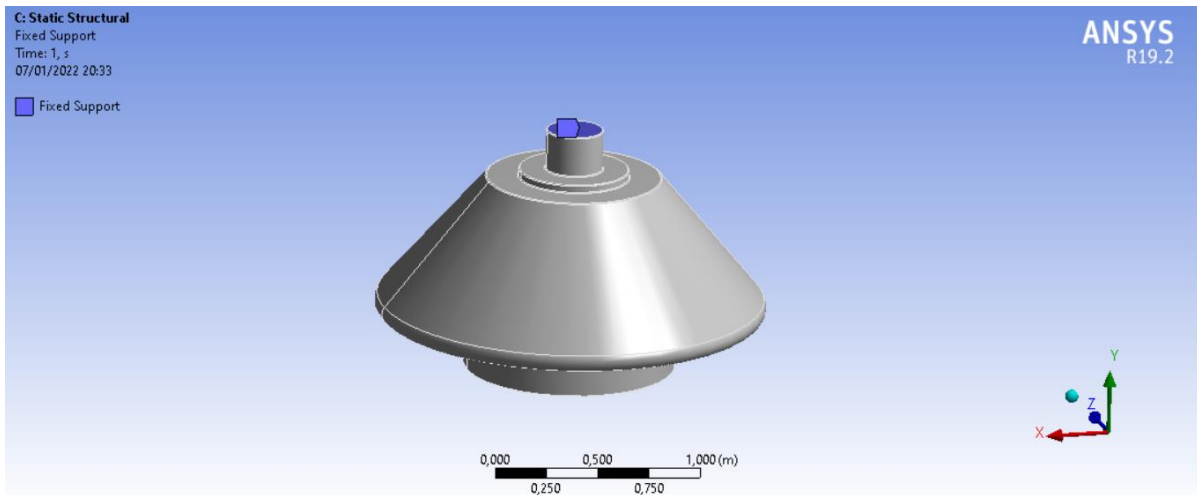


Figura41. Soporte de la campana interior

Si se analizan las deformaciones ocasionadas en la campana interior de trituración es importante destacar la robustez y rigidez conseguida mediante la geometría realizada, ya que la deformación máxima que se genera con las sollicitaciones aplicadas no llega a 1mm. Esta diferencia de deformación con respecto a la cámara exterior analizada anteriormente se debe a la geometría que presenta, ya que se ha realizado el ensayo bajo las mismas condiciones que la utilizadas en el punto anterior. Es importante destacar también que, aunque el valor de deformación es pequeño, esta afecta a casi toda la geometría. Esta influencia de deformación que se reparte por toda la geometría no es preocupante, ya que en todos los puntos es inferior a 1mm.

La tensión máxima de von Mises que aparece es de 144MPa. Si se compara con la tensión máxima obtenida para la cámara de trituración exterior de 269,2MPa se aprecia una importante reducción. El coeficiente de seguridad para este componente es de $\frac{441MPa}{144MPa} = 3$. Por lo tanto, se consideran admisibles los esfuerzos generados y se concluye el ensayo con el visto bueno de la cámara interior de trituración.

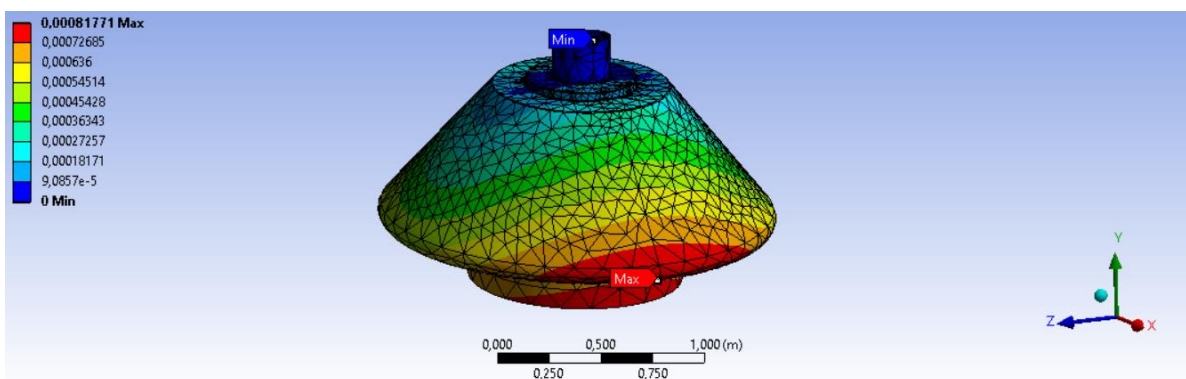


Figura42. Deformaciones máximas de la cámara interior calculadas con Ansys

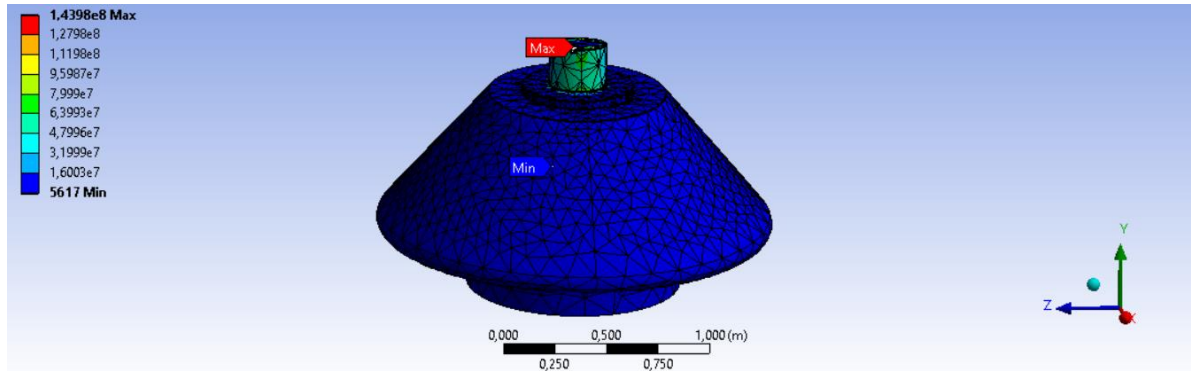


Figura43. Tensión máxima de von Mises de la cámara interior calculada con Ansys

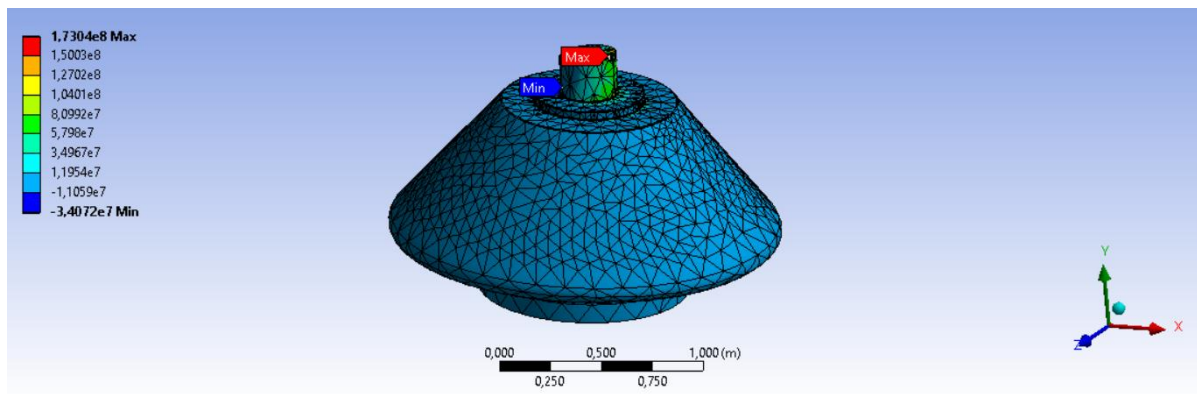


Figura44. Tensiones máximas de la cámara exterior calculadas con Ansys

8.2.4 Ensayo de impacto

Además de los ensayos analizados anteriormente se realizaron varios ensayos de impacto para conocer las sollicitaciones que se podían generar como consecuencia de la velocidad lineal de la campana interior de 0,5 m/s. Para el desarrollo de estos ensayos se fijaba el árido que se va a triturar y se le aplicaba una velocidad lineal a la campana interior hasta que se producía el impacto entre ambos.

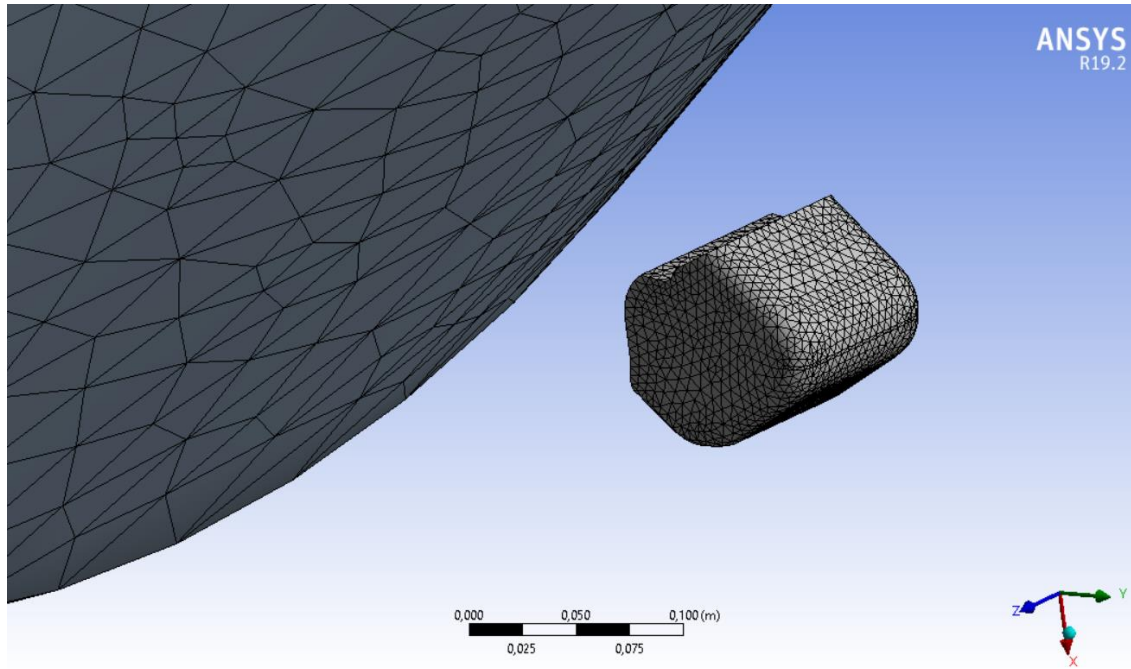


Figura45. Mallado de la cámara interior y del árido a tritución

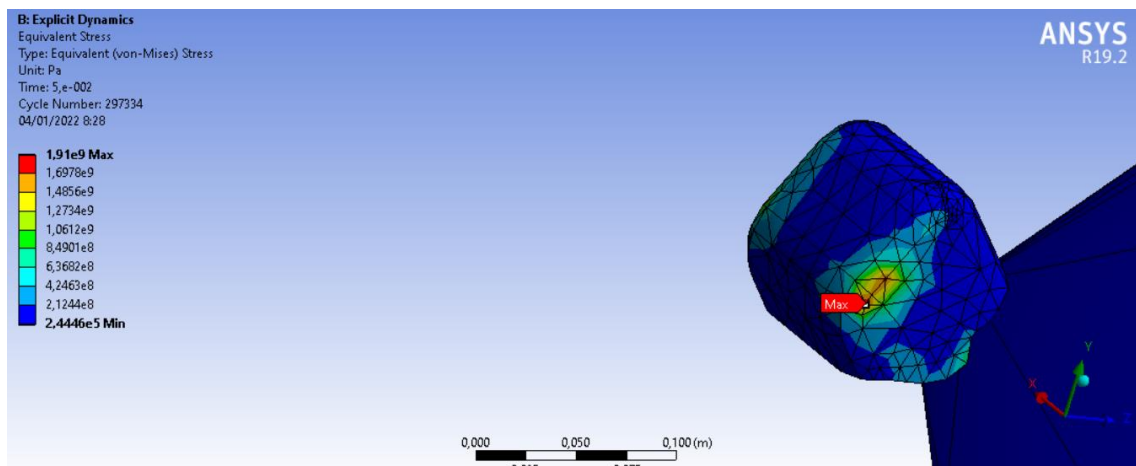


Figura46. Resultados del impacto. Tensión equivalente de von Mises calculada con Ansys

Los resultados aportados por Ansys no concordaban con el orden de magnitud calculado anteriormente, y tras varios intentos se tomó como un ensayo no válido. Este tipo de ensayos requieren de un gran conocimiento del programa Ansys, además de necesitar un tiempo de cálculo estimado de unas 18-24 horas con mallados poco precisos. Por lo tanto, este tipo de ensayos se tomaron como no válidos para la primera fase del proyecto, y se tendrán en cuenta en futuras fases del diseño.

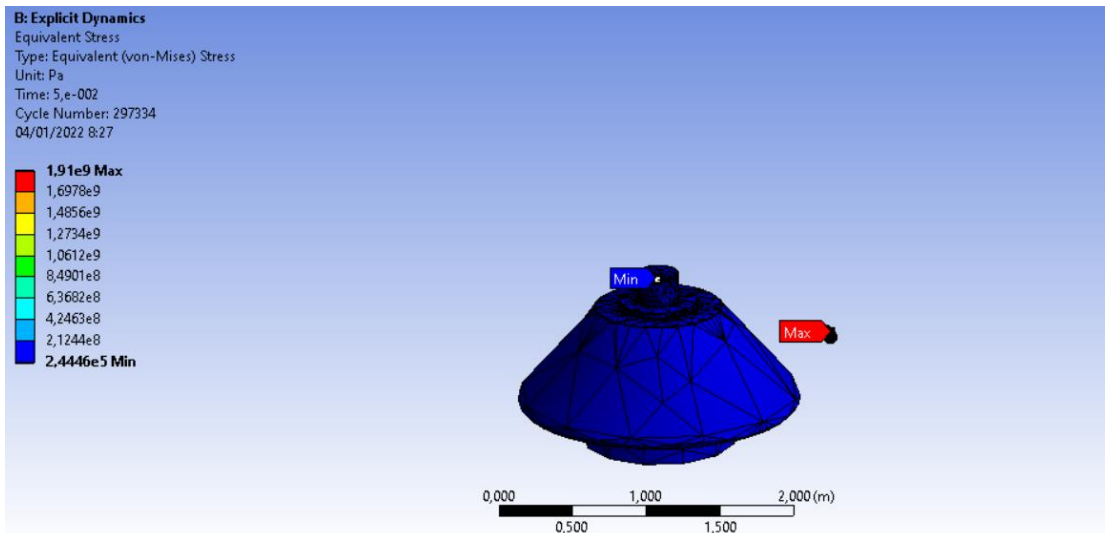


Figura47. Resultados fallidos del impacto calculado con Ansys

8.3 Análisis de vibraciones para mantenimiento predictivo

8.3.1 Introducción

En los últimos 70 años las metodologías para evaluar el estado de funcionamiento en las máquinas han sufrido una gran evolución gracias a los ordenadores y los equipos de control y medida digital. Un elemento fundamental para prevenir los posibles problemas mecánicos es el monitorizado de las condiciones de funcionamiento de las máquinas (Condition Monitoring). Analizando y midiendo las vibraciones se consigue la anticipación a cualquier problema mecánico, ya sea por mantenimiento o por fallo en el diseño.

La filosofía del mantenimiento predictivo se basa en el conocimiento del comportamiento normal de la máquina. Conociendo los parámetros de comportamiento que deben seguir los equipos para un funcionamiento correcto, se realizará una comparación con los parámetros reales obteniéndose conclusiones sobre los elementos que van a producir un fallo y cuando lo harán.[4]

8.3.2 Condition Monitoring

En condiciones estándar de funcionamiento, toda máquina tiene una forma característica de vibrar (vibration signature). Con la aparición de un fallo, dicha forma característica de vibración que posee cada máquina se verá afectada y en función de los datos obtenidos se relacionará con un fallo en concreto. El análisis frecuencial será el factor en el que se basan las técnicas de diagnóstico.

8.3.3 Mantenimiento predictivo en equipos de trituración. Puesta en marcha

Como se ha comentado anteriormente, el mantenimiento predictivo juega un papel muy importante en el normal funcionamiento de las máquinas. Va a ser necesario para corregir los posibles errores en el funcionamiento de los dispositivos, evitando averías muy costosas y paradas en la línea de producción. Además, será necesario para cumplir la normativa aplicable para la evaluación de niveles de vibración de las máquinas analizadas¹⁰.

En Tecymacan, contamos con un equipo para el análisis del desequilibrio dinámico en las máquinas rotativas. El proceso de equilibrado de precisión se basa en mediciones de vibración, amplitud y fase a la frecuencia de giro. El equipo utilizado para realizar las mediciones ha sido adquirido a la empresa Preditec, y es empleado en la puesta en marcha y durante la vida útil de los trituradores de áridos. Se considera de gran importancia, más aun siendo una máquina que se fabrica por primera vez y de la que se desconocen muchos parámetros y factores de funcionamiento, la realización de un análisis de desequilibrio dinámico una vez fabricada durante los ensayos realizados en el banco de pruebas

¹⁰ ISO 10816-3

8.3.4 Análisis dinámico de vibraciones en Molino Aremar I-D

Se va a explicar el procedimiento a seguir en la puesta en marcha realizada durante la semana del 16/12/2021 en un molino impactor. El procedimiento seguido será muy similar al que se realizará una vez finalizado el proyecto del molino de cono. Con los datos obtenidos en análisis de desequilibrio dinámico se podrán detectar posibles errores en el diseño, montaje, componentes, condiciones de funcionamiento, etc. El objetivo de la exposición del procedimiento seguido en un molino de características similares al molino de cono es exponer al lector cuáles serán las operaciones por realizar en la fase de pruebas. Como se ha comentado anteriormente, se ha estimado una duración de realización del proyecto de 3 años. Por esta razón, en el documento presente se abordará la primera fase de diseño expuesta en puntos anteriores. En esta primera fase se incluye el estudio del análisis dinámico del equipo una vez esté fabricado.

Según el fabricante, se indican las posiciones en las que es conveniente situar el aparato de medida. Con la máquina en marcha, se tomarán los datos de amplitud de velocidad y las frecuencias en todos los puntos indicados con el equipo cargado y sin cargar. Posteriormente se analizarán con los datos en condiciones estándar que proporciona el fabricante según las características (velocidad de giro, potencia, tipo de asiento). Se ha considerado muy interesante documentar este tipo de ensayos de análisis de vibraciones en el TFG, ya que, aunque corresponda a las fases finales del proyecto completo, durante las semanas de elaboración de este se realizó un ensayo de este tipo para la puesta en marcha de un molino impactor.

En la figura 48 se pueden apreciar los resultados obtenidos en la primera medición realizada en el molino impactor. La amplitud de la velocidad es de 6,93 mm/s. Para una máquina grande en el intervalo de potencia de 300kW-50MW con base flexible el estado de la máquina es de tipo B, es decir, la máquina puede operar indefinidamente [1].



Figura48. Medición de las vibraciones en la puesta en marcha de un molino impactor

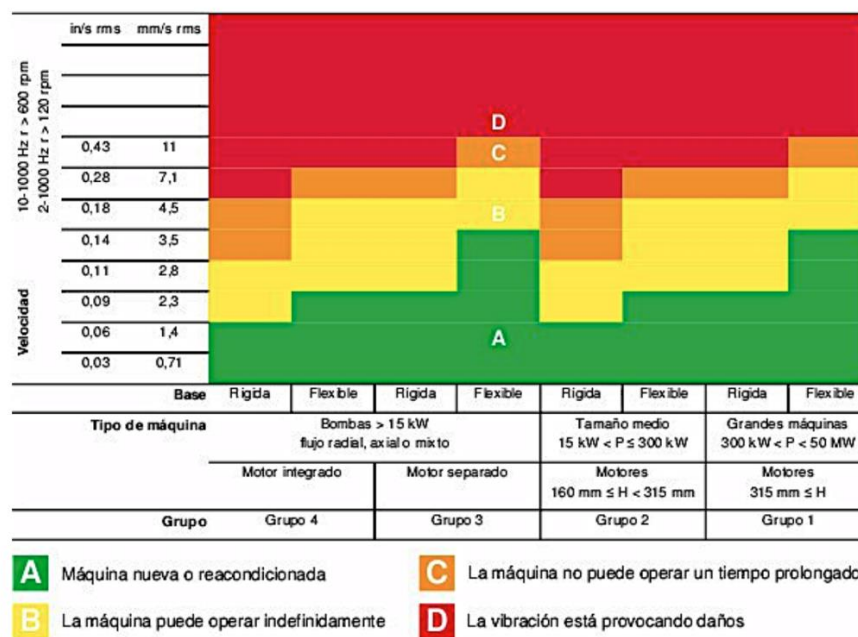


Figura49. Normativa sobre vibraciones en base al tipo de máquina [1]

En la figura 50 se pueden apreciar las frecuencias de los picos de resonancia medida en Hz y el valor de la amplitud medido en mm/s. Según los datos obtenidos en el aparato de medida se podrá conocer si algún componente de la máquina está fallando. Para asociar cada gráfica de frecuencias el fabricante aporta una serie de gráficas modelo en las que se detalla la amplitud y frecuencia a la que aparecerán los picos de resonancia en función del tipo de fallo que se puede generar.



Figura50. Gráfica de frecuencias obtenidas en la puesta en marcha de un molino impactor

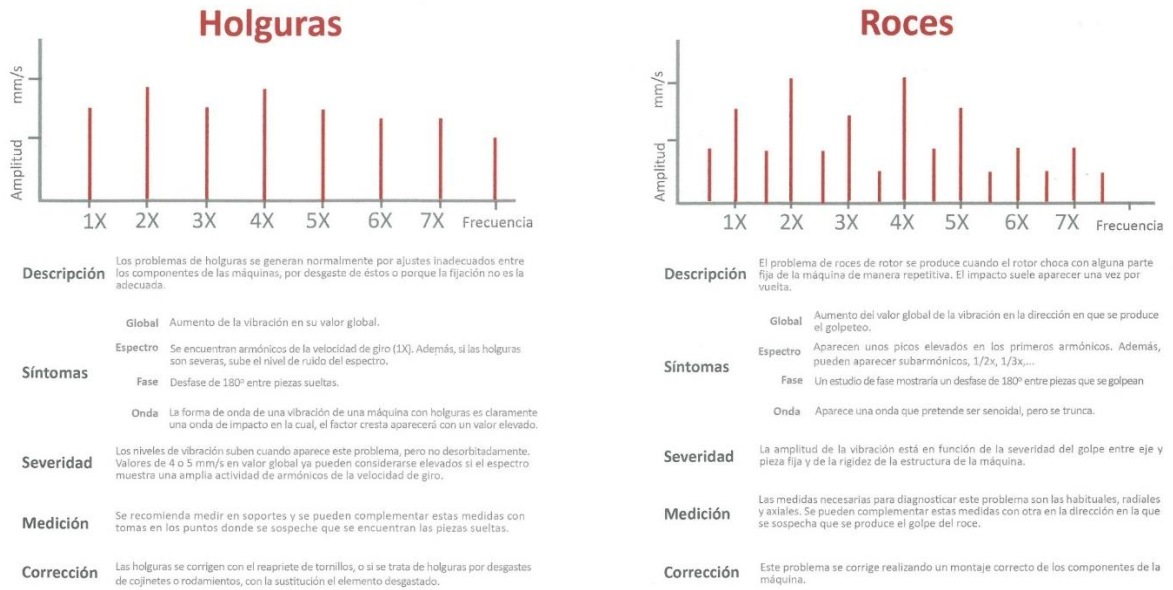


Figura51. Gráficas de identificación de fallo aportadas por el fabricante [1]

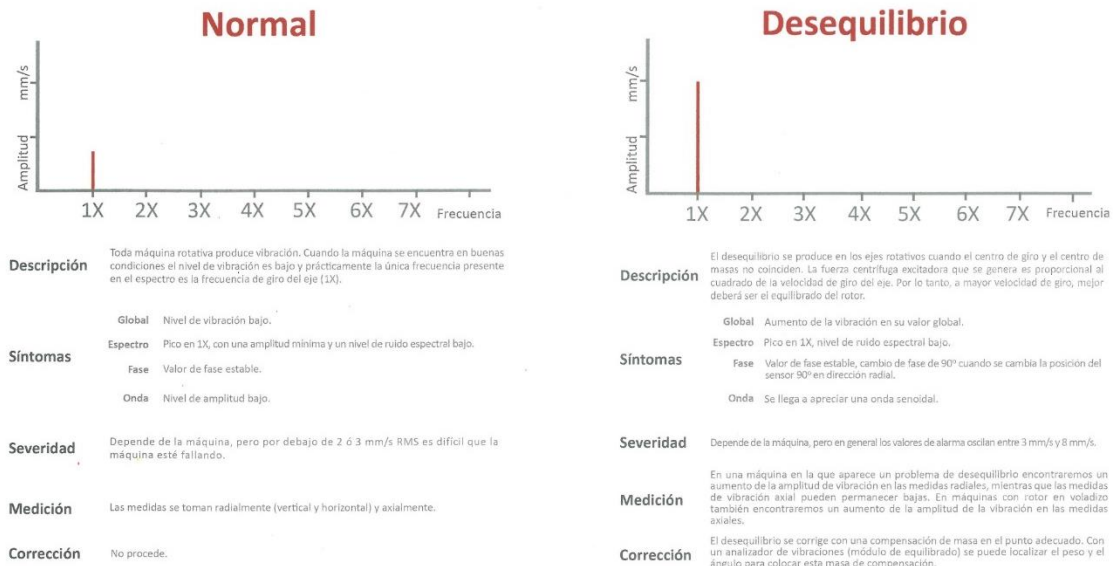


Figura52. Gráficas de identificación de fallo aportadas por el fabricante [1]

9. Desarrollo de sistemas de mejora para un molino de cono

9.1 Estudios realizados

Se va a realizar un estudio para implementar un volante de inercia en el sistema de giro del triturador de cono. El objetivo de este estudio no es otro que el de mejorar los sistemas de trituración giratoria actuales, obteniéndose mejoras en la producción, rendimiento, consumo de energía y calidad del material obtenido.

En los siguientes gráficos se muestra la potencia necesaria para llevar a cabo el proceso de trituración en 1,5 segundos de operación.

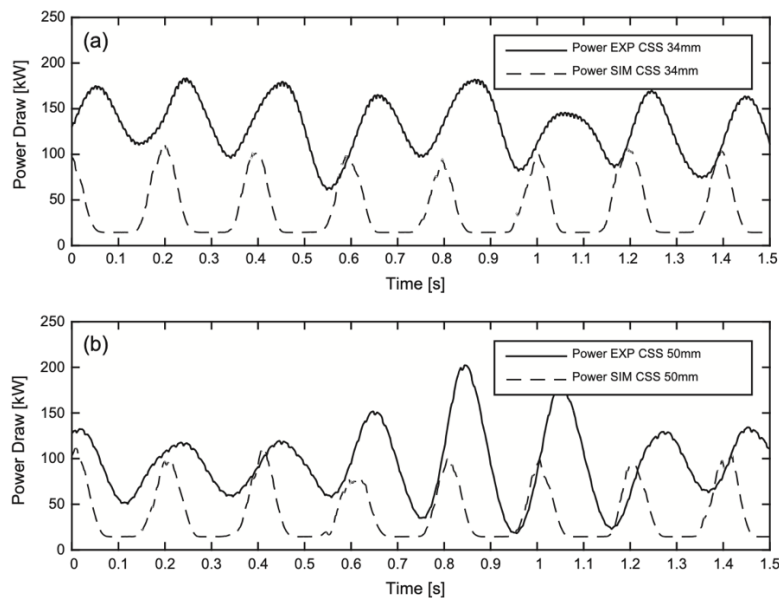


Fig. 20. The plot displays a comparison of simulated and measured power draw for 1.5 s of operation.

Figura53. Potencia en 1,5 segundos de operación [2]

Analizados los anteriores resultados, y tras estudiar la entrega de potencia del motor eléctrico y la presión obtenida en el interior de la cámara, se llega a la conclusión de que, si se consigue implementar un volante de inercia en el eje de giro con éxito, se podría obtener una entrega de potencia y presiones en función del tiempo con una tendencia más lineal. Este aspecto de entrega de potencia lineal es fundamental para reducir vibraciones en los equipos conminación. Además, se realizará el mismo trabajo que se realizaba inicialmente sin volante de inercia, pero con un motor de menor potencia gracias a la acción del volante de inercia implementado en el eje de rotación.

Para demostrar la actuación del volante de inercia sobre el sistema de trituración se van a realizar dos modelos. Uno de ellos únicamente con el eje de giro y el triturador de cono, y en el segundo modelo se implementará el volante de inercia en el eje.

Si el momento que se genera en el modelo original es mayor que el momento generado en el modelo a estudiar con volante de inercia, se habrá demostrado que la implementación de un volante de inercia en el eje de giro del molino de cono produce efectos beneficiosos sobre el funcionamiento del molino. Con este estudio se pretende demostrar que, al introducir un volante de inercia en el eje del molino, tanto la potencia del motor como las presiones generadas en el interior de la cámara van a adoptar una tendencia lineal.

10. Conclusiones

Para concluir con el TFG me gustaría mencionar en primer lugar, el gran aprendizaje que he tenido en la realización de este. El punto de partida fue una propuesta para el diseño y la fabricación de un nuevo modelo de triturador. En ese momento, el conocimiento que tenía sobre el sector de los áridos era prácticamente nulo. Después de varios meses de investigación y la participación en varios proyectos empresariales para la instalación de maquinaria para el procesado de áridos, fui aprendiendo poco a poco todo lo relativo a esta industria. Día a día iba aprendiendo nuevas cosas, y cuanto más conocimiento tenía, más me daba cuenta de la complejidad del diseño en el que estaba trabajando. Después de varios meses de trabajo creo que se han obtenido unos buenos resultados. Si bien es cierto que el trabajo realizado hasta ahora es una pequeña parte del proyecto completo para la fabricación de un molino de cono, pero la cantidad de información y análisis realizados constituirán una sólida base para continuar con el proyecto.

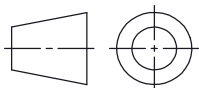
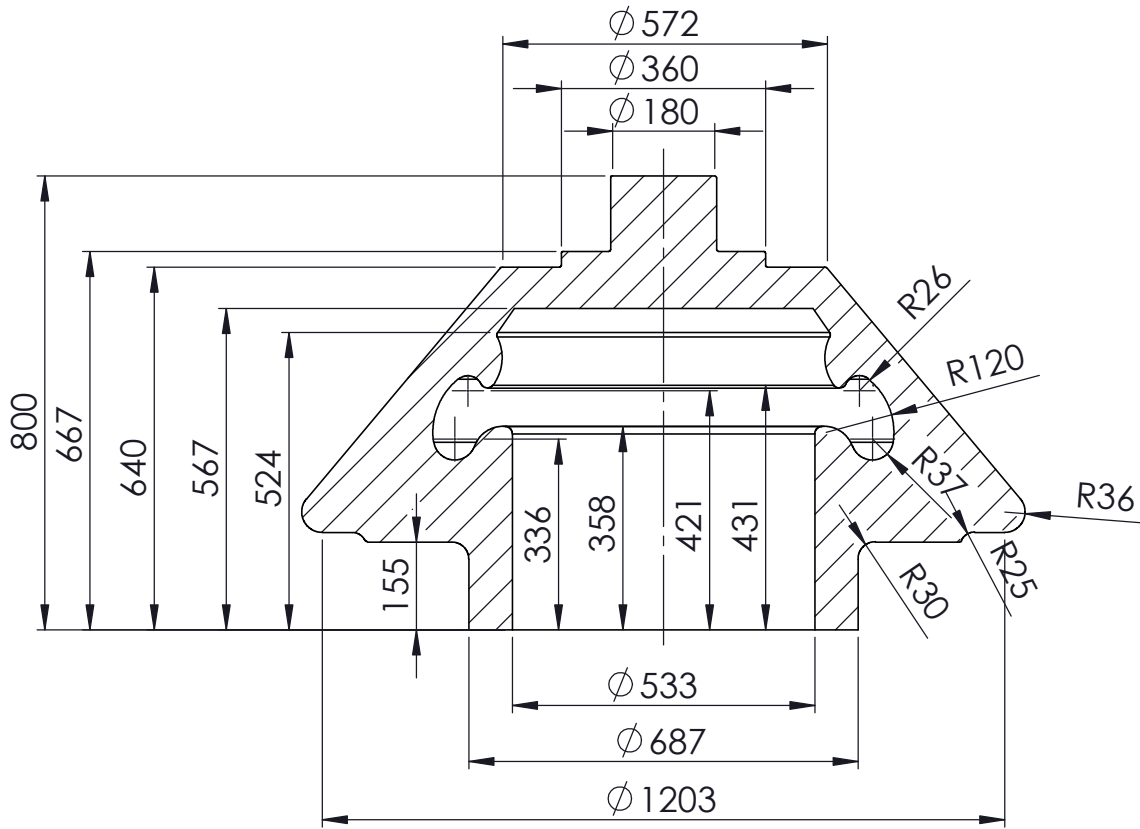
Por otra parte, la realización de los cálculos de una manera teórica mediante el manual de resistencia de materiales ha sido un punto muy positivo para conocer la magnitud de las solicitaciones a las que se verán sometidas los elementos de trituración, y posteriormente realizar una comparación con los resultados obtenidos mediante el MEF.

Bibliografía

- [1] Preditec, «Análisis de vibraciones para mantenimiento predictivo,» 2016.
- [2] J. Q. y. M. Evertsson, «Cone crusher modelling and simulation using DEM,» *Minerals Engineering*, 2016.
- [3] O. F. H. Cobos, C. M. Moreno Téllez y B. A. Suárez Tova, «Evolución microestructural del acero austenítico sometido a tratamiento térmico de temple y revenido,» *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 2009.
- [4] J. M. P. Borobia, «Mantenimiento predictivo,» Pamplona.
- [5] L. Fueyo Casado, M. Bustillo Revuelta y A. Durán López, Manual de áridos, Fueyo Editores.
- [6] C. L. J. y. C. L. Frades, Manual de áridos para el siglo XXI, Madrid: Fueyo Editores, 2020.
- [7] A. V. M. G.S. Pisarenko, Manual de resistencia de materiales, Rumania: Editorial Mir, 1979.
- [8] A. D. L. y. L. F. Casado, Selección práctica y aplicaciones de los equipos de trituración, Madrid: Fueyo Editores, 2007.
- [9] Metso, «Tecnología minera,» Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://tecnologiaminera.com/actualidad/metso-outotec-como-prevenir-fracturas-de-eje-en-trituradoras-de-cono-hpr-mpr-1613709820>.
- [10] N. y. Soler, «Youtube-ANSYS - Cálculo de Impactos con ANSYS Mechanical "Crash Test",» 2020. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ZjZwUgeT8F8&t=1555s>.

PLANOS

DOCUMENTO 2



Fecha: 10/01/2022

Nafarroako
Unibertsitate
Publikoa



Universidad
Pública de
Navarra

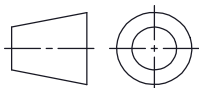
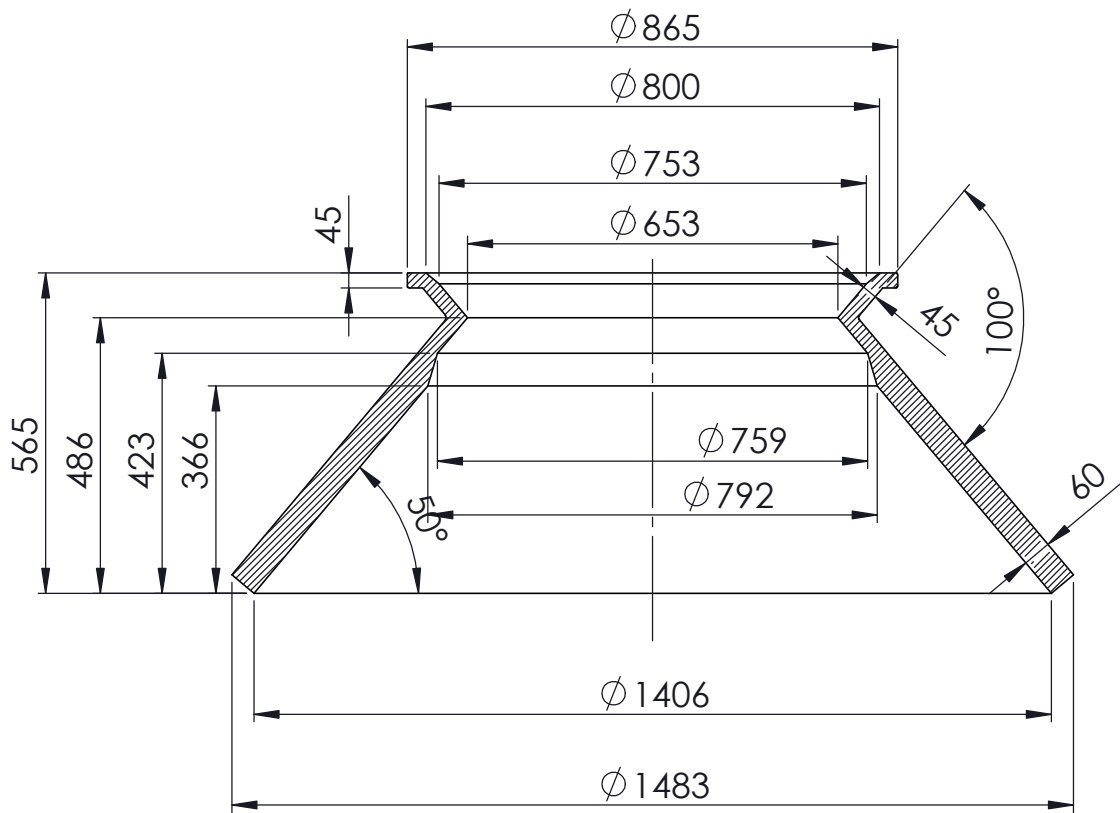
Dibujado
Sergio Serrano Diaz
Revisado:
Aprobado:

Cliente:

Tamaño: Material: Descripción:
Acero Cámara de trituración interior

Página: Peso (Kg): Plano N°:
1/2 - CT_01

Escala:
1/30



Fecha: 10/01/2022

Ciente:

Tamaño:

Material:
Acero

Página:
2/2

Peso (Kg):
-

*Nafarroako
Unibertsitate
Publikoa*



**Universidad
Pública de
Navarra**

Descripción:
Cámara de trituración exterior

Plano N°:
CT_02

Dibujado

Sergio Serrano Diaz

Revisado:

Aprobado:

Escala:
1/30