

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS PARA LA
PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS EN EL LABORATORIO DE MATERIALES
Y CATÁLISIS DE LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA.**



DUEÑAS REYES JESÚS DAVID

GONZÁLEZ BALLESTEROS VLADIMIR ELÍAS

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA, CÓRDOBA

2016

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS PARA LA
PULVERIZACIÓN DE ARCILLAS EN EL LABORATORIO DE CATÁLISIS
DE LA UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA.**

DUEÑAS REYES JESÚS DAVID

GONZÁLEZ BALLESTEROS VLADIMIR ELÍAS

Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero

Mecánico

Director del proyecto

YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA M.Sc.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA, CÓRDOBA

2016

Responsabilidad ética, legal y científicas de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores

(Artículo 61, acuerdo 093 de 26 de noviembre del 2012, Consejo Superior)

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Montería, diciembre de 2016

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado muy especialmente a mi padre Dios y a mi madre Kenia Eugenia Dueñas Reyes quienes me han acompañado siempre en cada paso de mi vida brindándome sus consejos y su apoyo incondicional, y a mi familia quienes han sido mi ejemplo de vida superando todas las adversidades.

Jesús David Dueñas Reyes

Este trabajo está dedicado a mis padres y hermanos quienes han sido el apoyo incondicional, que me permitió culminar mi formación profesional, Ana Comas, el amor de mi vida y a mi Dios que todo le debo.

Vladimir Elías González Ballesteros

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por su compañía y guía a lo largo de nuestra carrera, por ser nuestra fortaleza en los momentos de dificultad y por permitirnos terminar este ciclo de nuestras vidas, lleno de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A nuestros padres, por todo el apoyo a lo largo de nuestras vidas, quienes siempre fueron nuestro impulso para seguir.

Agradecemos a nuestro director, profesor y amigo, al ingeniero Yahir González por habernos brindado la oportunidad de desarrollar este proyecto bajo su orientación, por todo su apoyo, asesoría y colaboración.

A nuestros profesores, al ing. Demóstenes Durango, Ing. Jairo Durango, Ing. Valery Lancheros, Dr Luís Armando Espítia y al Dr. Jorge Mario Mendoza les agradecemos por todo el apoyo brindado a lo largo de la carrera, por su tiempo, amistad y por los conocimientos que nos transmitieron.

Al Ing. Vladimir Elnik por su ayuda incondicional y a su equipo de trabajo por su apoyo en el desarrollo de nuestro proyecto, a quienes presentamos nuestro reconocimiento y gratitud por su colaboración.

También muy agradecidos con el coordinador del laboratorio de Materiales y Catálisis Mario Barrera por su amable cooperación.

Y por último muchas gracias a nuestros amigos, por todos los momentos que pasamos juntos, por todas las tareas que realizamos juntos y por haber hecho de nuestra etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaremos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	XIV
ABSTRAC	XV
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
3.1 LA TÉCNICA DE LA MOLIENDA. GENERALIDADES	20
3.2 TIPOS DE MOLINOS	21
3.2.1 Molinos a Martillo	21
3.2.2 Molinos Verticales o de Rodillos.....	22
3.2.3 Molinos Pendulares.....	23
3.2.4 Molinos de Barras	23
3.2.5 Molinos de Bolas	24
3.2.5.1 Operación	26
3.2.5.2 Factores que afectan la eficiencia en la molienda de un Molino de Bolas	29
3.2.5.3 Parámetros del Molino	29
3.2.5.3.1 Potencia exigida por un Molino de Bolas.	30
3.2.5.3.2 Velocidad Crítica del Molino.....	31
3.2.5.3.3 Masa de carga.....	32
3.2.5.3.4 Dimensión de las bolas.....	33
3.2.5.3.5 Dimensiones del molino teniendo en cuenta como parámetro la Potencia.....	34
3.3 DISEÑO DE FLECHAS	35
3.3.1 Configuración del eje.....	35
3.3.1.1 Materiales de ejes.....	36
3.3.1.2 Diseño de ejes para el Esfuerzo	38
3.3.1.3 Esfuerzos en ejes	38
3.3.2 Velocidades críticas de ejes	44
3.3.3 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga.....	47
3.3.3.1 Factor de la condición superficial k_a	48
3.3.3.2 Factor de tamaño	48
3.3.3.3 Factor de carga k_c	49

3.3.3.4	Factor de temperatura k_d	49
3.3.3.5	Factor de confiabilidad k_e	50
3.3.3.6	Factor de efectos varios k_f	50
3.3.4	Concentración del Esfuerzo y Sensibilidad a la muesca	50
3.4	SELECCIÓN DE COJINETES DE BOLAS.	53
3.4.1	Relación carga-vida-confiabilidad	55
3.5	TRANSMISIÓN DE POTENCIA POR ENGRANES.	56
3.5.1.	Tipos de Engranés.....	56
3.5.1.1	Nomenclatura.	58
3.5.2	Trenes de Engranés.	61
3.6	ARCILLA.	64
3.6.1	Arcilla Esmectita o Montmorillonita	65
3.6.1.1	Composición Química.....	65
3.6.1.2	Propiedades Físicas.	65
3.6.2	Proceso de Caracterización	71
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	76
4.1	ETAPA I: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INICIALES	76
4.2	ETAPA II: DISEÑO	78
4.3	ETAPA III: PROTOTIPO FÍSICO Y ENSAYOS.....	86
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
6.	CONCLUSIONES.....	127
7.	RECOMENDACIONES	128
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	129
9.	ANEXOS.....	133

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del tipo de molienda.....	26
Tabla 2. Índices de trabajo de Molienda de Bond.....	31
Tabla 3. Velocidad crítica en función del diámetro del molino.....	32
Tabla 4. Resistencias mínimas determinísticas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD)	37
Tabla 5. Cortante, momento y deflexión de vigas.	46
Tabla 6. Cortante, momento y deflexión de vigas. Apoyos simples cargas idénticas. ..	47
Tabla 7. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin, ecuación 30.....	48
Tabla 8. Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero.	49
Tabla 9. Factores de confiabilidad k_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del S_e	50
Tabla 10. Estimación de primera estimación de K_t y K_{ts}	52
Tabla 11. Recomendaciones de vida de cojinetes para varias clases de maquinaria.	56
Tabla 12. Factores de aplicación de carga.	56
Tabla 13. Durezas equivalentes para algunos minerales.....	66
Tabla 14. Densidades en diferentes estados de la arcilla (Tn/m^3).....	66
Tabla 15. Guía de ensayos previos a muestras de Arcillas.	87
Tabla 16. Denominaciones y Tamaños de Tamices.....	87
Tabla 17. Requerimientos de Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba como parámetros de verificación.	88
Tabla 18. Resultados alcanzados por el Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba mediante pulverización manual de Arcilla.	88
Tabla 19. Influencia de algunos materiales con respecto a la arcilla.....	92
Tabla 20. Propiedades Físicas del Policloruro de Vinilo.....	93
Tabla 21. Propiedades Físicas del AISI/SAE 52 100.....	95
Tabla 22. Comparación de distintos sistemas de transmisión.....	99
Tabla 23. Factor y Clase de Servicio de engranes Rectos.....	102
Tabla 24. Valores del factor de forma de Lewis Y para un ángulo normal de presión de 20°	106
Tabla 25. Equivalencia entre los valores de la Figura 27 y el diagrama de cuerpo libre del eje para el analisis del plano (X-Y).	108
Tabla 26. Equivalencia entre los valores de la Figura 28 y el diagrama de cuerpo libre del eje para el analisis del plano (X-Z).	109
Tabla 27. Diámetro mínimo del eje en los puntos críticos del eje conductor.	110
de ranura profunda, de una sola hilera.....	112
Tabla 29. Diámetro mayor, Diámetro menor y radios de filete en los puntos críticos del eje conductor.	113
Tabla 30. Valores de los factores de concentración de esfuerzos en los puntos críticos del eje conductor.....	114
Tabla 31. Valores de $[\sqrt{a}]$ - flexión y $[\sqrt{a}]$ - torsión en los puntos críticos del eje conductor.	114
Tabla 32. Valores de $q_{flexión}$ y $q_{torsión}$ en los puntos críticos del eje conductor.	114

Tabla 33. Valores de K_f y K_{fs} en los puntos críticos del eje conductor.	115
Tabla 34. Valores de K_b y S_e en los puntos críticos del eje conductor.	115
Tabla 35. Factor de seguridad n_f según el criterio de Soderberg en los puntos críticos del eje conductor.	115
Tabla 36. Elementos Mecánicos.	116
Tabla 37. Elementos Eléctricos.	117
Tabla 38. Procesos de Manufactura Empleada para la Construcción de los Diferentes Componentes del Dispositivo	119
Tabla 39. Resultados de ensayos de funcionamiento.	123
Tabla 40. Validación del equipo	125
Tabla 41. Ficha Técnica	146
Tabla 42. Manual de Uso.	147
Tabla 43. Recomendaciones de Mantenimiento.	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Molino a martillos.....	21
Figura 2. Molino de martillos.....	22
Figura 3. Molino de barras.....	24
Figura 4. Corte Transversal de un Molino de bolas.....	24
Figura 5. Molino de bolas.....	25
Figura 6. Vista transversal de la disposición de la carga, dentro del molino.....	33
Figura 7. Diagrama de Goodman modificado que muestra todas las resistencias y los valores límite de cada una de las componentes del esfuerzo para un esfuerzo medio particular.....	41
Figura 8. Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla.....	41
Figura 9. Eje de diámetro uniforme.....	45
Figura 10. El coeficiente de influencia δ_{ij} es la deflexión en i , debida a una carga unitaria en j	45
Figura 11. Gráficas de K_{ts} para eje redondo con filete en el hombro en torsión. $\tau_0 = Tc/J$, donde $c = d/2$ y $J = \pi d^4/32$	51
Figura 12. Gráficas de K_t para eje redondo con filete en el hombro en flexión. $\sigma_0 = Mc/I$, donde $c = d/2$ y $I = \pi d^4/64$	51
Figura 13. Nomenclatura de un cojinete de bolas.....	53
Figura 14. Tipos de cojinetes de bolas.....	53
Figura 15. Engranés rectos.....	58
Figura 16. Engranés helicoidales.....	58
Figura 17. Engranés cónicos.....	58
Figura 18. Engrane de Tornillo Sinfn.....	58
Figura 19. Nomenclatura de los dientes de engranes rectos.....	60
Figura 20. Tren de engranes.....	62
Figura 21. Esquema de clasificación textural del suelo.....	64
Figura 22. Dimensionamiento longitudinal del eje conductor.....	96
Figura 23. Diagrama de cuerpo libre de la rueda sobre el eje conductor.....	97
Figura 24. Diagrama de cuerpo libre del eje conductor.....	97
Figura 25. Diagrama de cuerpo libre de la distribución de carga del tambor, asumido como partícula.....	98
Figura 26. Selección de Módulos de engranes Rectos.....	103
Figura 27. Diagrama de distribución de fuerza cortante y de momentos en el plano (X-Y) sobre en el eje conductor.....	107
Figura 28. Diagrama de distribución de fuerza cortante y de momentos en el plano (X-Z) sobre en el eje conductor.....	108
Figura 29. Dimensiones eje conductor.....	113
Figura 30. Dimensiones eje conductor.....	113
Figura 31. Ensamble final del equipo Molino de Bolas.....	118
Figura 32. Representación gráfica de ensayos de funcionamientos de funcionamiento.....	124
Figura 33. Desgaste en bandas de tracción después de ensayo E5.....	126

Figura 34. Engranés	141
Figura 35. Ejes y rodillos de Tracción	141
Figura 36. Rodamientos	141
Figura 37. Tambor y bandas de tracción	141
Figura 38. Carcasas	142
Figura 39. Base y Placas de Soporte	142
Figura 40. Sistema Eléctrico	142
Figura 41. Ensamble de transmisión y soporte	143
Figura 42. Ensamble preliminar	143
Figura 43. Molino de Bolas.....	143
Figura 44. Urna de vidrio para el almacenamiento de arcilla	144
Figura 45. Espátulas	144
Figura 46. Balanza Digital	144
Figura 47. Tamiz Standard #200 (250 μm) según norma A.S.T.M. E-11	145
Figura 48. Tamiz Standard #60 (250 μm) según norma A.S.T.M. E-11	145
Figura 49. Tapabocas	145

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO A.	PLANOS CONSTRUCTIVOS.....	133
ANEXO B.	IMÁGENES DE CONSTRUCCIÓN.	141
ANEXOB1.	Sistema de Transmisión de Potencia.....	139
ANEXO B2.	Sistema Estructural.....	140
ANEXO B3.	Sistema Eléctrico.....	140
ANEXO B4.	Ensamblés Previos.....	141
ANEXO B5.	Ensamble Final.....	141
ANEXO C.	IMPLEMENTOS USADOS EN LOS ENSAYOS DE FUNCIONAMIENTO.....	144
ANEXO D.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	145
ANEXOD1.	Ficha Técnica.....	146
ANEXOD2.	Manual de Uso.....	147
ANEXOD3.	Recomendaciones para inspección de Mantenimiento.....	148
ANEXO E.	CATÁLOGO DE ALGUNOS COMPONENTES.....	149
ANEXO E1.	Catálogo FAG WL 41 520/35 B-Rodamientos rígidos de bola de una hilera.....	149
ANEXO E2.	Catálogo Tubosistemas Sanitaria PVC PAVCO.....	150
ANEXO E3.	Ficha Técnica de Guantes Industriales Latexport. S.A.S.....	151
ANEXO E4.	Catálogo de Accesorios PVC PAVCO.....	153
ANEXO E5.	Especificaciones de Rodamiento 6200 2RS C3 PFI.....	154

RESUMEN

El presente proyecto realiza el diseño y construcción de un molino de bolas con el objetivo de brindar al laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba, una solución funcional y rápida al proceso de pulverización manual de arcilla seca que venían efectuando, para fines de ser usada en la realización de prácticas de caracterización. Esta solución se desarrolló mediante la ejecución de tres etapas encaminadas hacia la ejecución de los objetivos planteados.

En una primera etapa se logró obtener los parámetros iniciales mediante entrevistas realizadas al coordinador del laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba con el fin de definir las especificaciones de entrada y salida del diseño. La segunda etapa consistió en hacer uso de la revisión literaria necesaria para lograr diseñar los elementos mecánicos y determinar los parámetros de operación que componen el molino de bolas. Finalmente se llevó a cabo la construcción y posterior prueba funcional del prototipo mediante ensayos experimentales.

Con la construcción del dispositivo se logró minimizar los tiempos de producción de arcilla pulverizada en un 98.5% con respecto a la proceso manual empleado en el laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba, además de ello duplicó la cantidad de material pulverizado, logrando así aumentar la realización de prácticas de caracterización de arcilla en el laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba 15 ensayos más de lo habitual, llegando a un total de 20 ensayos por periodo académico.

Este proyecto se desarrolló logrando el cumplimiento de los objetivos planteados de manera exitosa, realizando una contribución a la comunidad universitaria e incentivando a nuevas investigaciones en lo que a la arcilla se refiere.

Palabras clave: Molienda, Molturabilidad, velocidad crítica de rotación.

ABSTRAC

This project executes the design and construction of a ball mill in order to provide to Laboratory of Materials and Catalysis at the University of Cordoba, a functional and faster solution instead the manual clay pulverizing process, which used to be carried out in the characterization experiments. This solution was developed by running three stages aimed towards to achieve the planned objectives.

First stage it was possible to obtain the initial parameters through interviews to lab coordinator of Laboratory of Materials and Catalysis at the University of Cordoba in order to define the input and output specifications of the design. The second stage was to make use of the literature review necessary to achieve mechanical design elements and determine the operating parameters that make up the ball mill. Finally the construction and subsequent functional testing of the prototype through experimental trials was carried out.

With the construction of the device it was achieved to minimize production times of powdered clay by 98.5% compared to manual process used in the laboratory of

Materials and Catalysis at the University of Córdoba, besides it doubled the amount of powdered material, which carries the increasing of clay characterization experiments in the Laboratory of Materials and Catalysis at the University of Cordoba 15 times more than usual, reaching a total of 20 trials per academic period.

This project was developed by the achievement of the raised aims in a successful way, making a contribution to the university community and encouraging new researches in which clay refers.

Keywords: Grinding, Grindability, critical rotation speed.

INTRODUCCIÓN

El laboratorio de materiales y catálisis de la Universidad de Córdoba realiza con frecuencia prácticas para la caracterización de muestras de arcillas obtenidas de diferentes zonas del departamento de Córdoba y Sucre, estos ensayos necesitan la molienda de la arcilla seca, para reducirla y llevarla a tamaños de granos relativamente pequeños ($75\ \mu\text{m} - 250\ \mu\text{m}$), para realizar los análisis de laboratorio. Este proceso es realizado de forma manual por el personal del laboratorio usando herramientas no apropiadas para esta práctica, sumado a esto, un tiempo de 5 a 7 días (35 horas) es empleado para obtener un aproximado de 10 gr de arcilla, cantidad estrictamente necesaria para realizar un ensayo, con tamaños de entre 180 y 250 micras (μm).

Debido a la necesidad de mejorar el proceso de pulverización de arcilla en el laboratorio de materiales y catálisis, resulta conveniente contar con una herramienta o equipo práctico especializado en la pulverización de arcillas, mejorando la cantidad y calidad del material pulverizado en un menor tiempo, permitiendo así, realizar prácticas de caracterización con más frecuencia.

Alcántara Valladares J.R., (2008). Quien planteó el diseño práctico de un molino de bolas, como opción de tesis profesional, utilizó expresiones, y consideraciones analizadas y evaluadas en pruebas experimentales, de tal forma que sus resultados brindan confiabilidad en modelos industriales y en casos particulares con molinos a escalas. También De Carvalho y Tavares, 2013. Propusieron un modelo mecánico del molino de bolas, evaluando las variables a las que opera un molino de bolas mediante la aplicación de simulaciones, con el fin de analizar el efecto de las variables de operación y parámetros de diseño en la molienda.

Por todo lo anterior se da paso al diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de catálisis de la Universidad de Córdoba teniendo como punto de partida los parámetros iniciales de diseño dados por el laboratorio, los elementos mecánicos y los parámetros de operación que componen el molino de bolas, la construcción y validación del equipo realizando pruebas de operación.

1. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener los parámetros iniciales mediante entrevistas realizadas al coordinador del laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba con el fin de definir las especificaciones de entrada y salida del diseño.
- Diseñar los elementos mecánicos y parámetros de operación que componen el molino de bolas.
- Construir y validar el equipo realizando pruebas de operación y rendimiento.

3. REVISIÓN DE LITERATURA.

MARCO REFERENCIAL

3.1 LA TÉCNICA DE LA MOLIENDA. GENERALIDADES

La operación de molienda consiste esencialmente en producir unidades de masa inferior, a partir de trozos más grandes del material que se desea moler. Esta operación es generalmente necesaria bien sea para el caso de obtener polvos de una cierta finura, bien para homogeneizar productos de orígenes diferentes, o bien para acelerar una reacción química, dando presencia a una o varias sustancias minerales o químicas. Por imposición de la naturaleza de la propia materia y por los tratamientos físicos y químicos que puedan seguirse, la molienda o pulverización es a menudo una operación compleja, bajo su apariencia de simplicidad. En la operación de molienda es importante el tamaño en que se presenta el material que se desea molturar. Así, cuando la materia a tratar es de importante dimensión se hace necesaria una operación previa de machaqueo, que consiste en reducir, en uno o dos pasos, la granulometría de los trozos a un tamaño medio de unos 15 mm, consistiendo a continuación la molienda propiamente dicha en reducir definitivamente los trozos obtenidos de la operación anterior a un polvo fino que

pueda pasar en casi su totalidad por aberturas muy pequeñas: mallas de un tamiz cuya sección de paso sea sólo de algunas decenas de micras. (Ángulo García F. X., 2005).

3.2 TIPOS DE MOLINOS

3.2.1 Molinos a Martillo

Los molinos a martillos se basan en un eje horizontal giratorio del cual cuelgan articuladas, con oscilación libre, unas piezas metálicas, llamadas martillos, que golpean el material a moler al obligar a éste a pasar por los intersticios que quedan entre las paredes cilíndricas del molino, el eje y los propios martillos. Funcionan también, por tanto, por trituración. (Ángulo García F. X., 2005).

Este tipo de molinos también se emplea para la pulverización de materias poco resistentes a los golpes, pero además sirve también para materias de dureza media, como pueden ser los calcáreos y otras materias minerales. La producción que permiten es mayor que la de los pulverizadores, presentándose entre 1 y 60 Tn/h; pero la finura media que se puede obtener con ellos es bastante basta, del orden de 1 mm. (Alcántara Valladares J.R., 2008)(Ángulo García F. X., 2005).

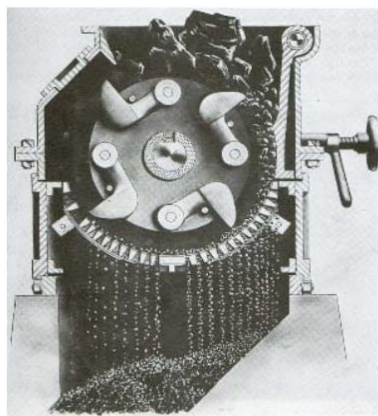


Figura 1. Molino a martillos
Fuente: (Ángulo García F. X., 2005).

3.2.2 Molinos Verticales o de Rodillos

Estos molinos constan de unos rodillos dispuestos horizontalmente sobre una pista situada en la parte inferior del molino y contra la cual producen el aplastamiento del material, por el propio giro de los rodillos, que va siendo suministrado por un alimentador que se encuentra por encima de ellos. (Ángulo García F. X., 2005).

También aptos tanto para molienda por vía seca como por vía húmeda, estos molinos están ideados para la preparación de masas para mono cocción blanca y roja, aunque también se pueden utilizar para la molienda de otros tipos de materiales. Las producciones que se pueden obtener con ellos son elevadas, hasta las 40 Tn/h; y las finuras son también más que aceptables, con valores de residuo que pueden llegar a ser del orden de tan sólo un 1% del material molido con granulometría superior a 60 micras. (Ángulo García F. X., 2005).

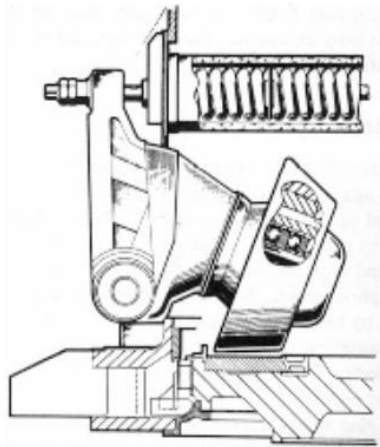


Figura 2. Molino de Rodillo
Fuente: (Ángulo García F. X., 2005).

3.2.3 Molinos Pendulares

Los molinos pendulares se usan para la molienda de todas las materias duras y también para aquellos casos en que se trabaja con materiales abrasivos. Así, se pueden moler calcáreos, fosfatos, materias minerales y químicas, arcillas, carbonatos, etc.

El principio de funcionamiento se basa en la acción de la fuerza centrífuga resultante del giro de los llamados péndulos respecto al eje vertical del molino, y que produce el aplastamiento del material entre los rodillos de dichos péndulos y un aro de rodadura fijo a la carcasa del molino. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

También pueden trabajar por vía húmeda, es decir, con el secado simultáneo del material que se está molturando. La granulometría que se puede obtener en el material de salida es muy fina, hasta de 40 micras; mientras que la producción es también elevada, de entre 0,5 y 40 Tn/h según las dimensiones del molino. (Alcántara Valladares J.R., 2008)

3.2.4 Molinos de Barras

Los molinos de barras, son grandes tubos cilíndricos, dispuestos horizontalmente. Están contruidos a base de planchas de acero, protegidas contra el desgaste y la corrosión por revestimientos metálicos intercambiables. La cámara cilíndrica gira alrededor de su eje horizontal apoyada en los extremos sobre unos cojinetes cilíndricos que descansan sobre unos soportes. Están contruidos por cuerpos moledores en forma de barras, que Están fabricadas de acero con alto contenido en carbono. Poseen un alto límite elástico para evitar que se tuerzan las barras evitando que se rompan o se traben con otras barras (Fig. 1.3). (Martínez P. 2011).

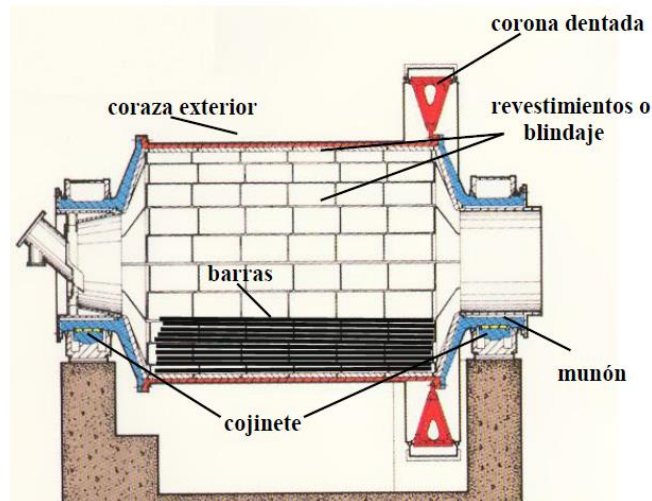


Figura 3. Molino de barras.
Fuente: (Martínez P. 2011).

3.2.5 Molinos de Bolas

Los molinos de bolas tienen una capa cilíndrica o cónica que gira sobre un eje horizontal, y se cargan con bolas bien sea de acero, pedernal o porcelana, como medio de molienda. La alimentación de los molinos de bolas deben ser de 2,4 a 4 cm (1 a 1½ in) para materiales muy frágiles, pero por lo general el tamaño máximo es de 1,3 cm (1/2 in), valores que han sido obtenidos por medio de ensayos experimentales. La mayor parte de los molinos de bolas operan con una razón de reducción de 20:1 a 200:1. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

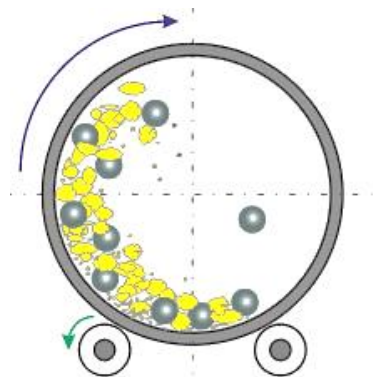


Figura 4. Corte Transversal de un Molino de bolas.
Fuente: (Alcántara Valladares J.R., 2008).

Los molinos de bolas, permiten la molienda, bien sea por vía seca o húmeda, de materias duras, muy duras y abrasivas: piritas, cuarzo y otros minerales duros. Son especialmente indicados para la molienda de materias extremadamente duras. (Ángulo García F. X., 2005). Las capacidades de estos molinos de bolas son, por lo general del 28% al 50% de la capacidad del molino, con medios de molienda de acero y recubrimientos; esto depende directamente de la densidad de los medios. (Alcántara Valladares J.R., 2008)

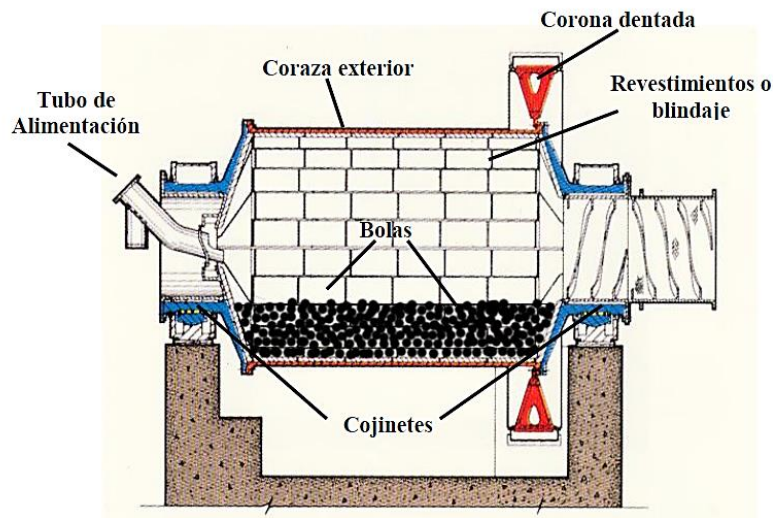


Figura 5. Molino de bolas.
Fuente: (Martínez P. 2011).

La operación de molienda se realiza en varias etapas; La primera etapa es la de fraccionar sólidos de gran tamaño, para la cual son utilizados los trituradores o molinos primarios, aquí los más usados son: el de martillos y el de mandíbulas. (Martínez P. 2011)

La segunda etapa es la de reducción de tamaño, esta etapa se lleva a cabo con más control, manejándose tamaños intermedios y finos. Para esta etapa el molino más empleado en la industria es el molino de bolas. El molino de bolas lleva a cabo la

mayor parte de la reducción por impacto. Cuando este gira sobre su propio eje, provoca que las bolas caigan en cascada desde la altura máxima del molino. Esta acción causa un golpeteo sobre el material a moler; además de un buen mezclado del material. De esta manera la molienda es uniforme. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

El molino de bolas es una herramienta vital para rectificar materiales que ya han sido triturados. Es apropiado para la molienda seca o mojada de varios tipos de materiales, en especial los más duros. Actualmente es muy utilizado en muchas industrias como la de cemento, materiales a prueba de fuego, productos de silicato, materiales para la construcción, fertilizantes, vidrio, cerámica, entre otros; también por su bajo consumo de energía. El molino de bolas mantiene una estructura simple comparada con otros molinos, una fácil instalación, largo tiempo de operación con alta capacidad, las partes que se desgastan son resistentes y con larga vida útil, y su producto de molienda mantiene una muy buena calidad. (XSM® 2014)

3.2.5.1 Operación

Tabla 1. Clasificación del tipo de molienda.

Tipo de proceso	Tamaño de salida
Molienda gruesa	$\cong 1 - 2 \text{ mm}$
Molienda fina	$\cong 50 - 100 \mu\text{m}$
Molienda ultra fina	$\leq 10 \mu\text{m}$

Fuente: (Martínez P. 2011)

La fragmentación de las partículas se va a conseguir por medio de la combinación de fuerzas de compresión, cizalladura y abrasión. La fragmentación del mineral se realiza en el interior de unos equipos cilíndricos rotatorios de acero que se conocen con el nombre de molinos de rodamiento de carga o simplemente molinos. Estos equipos

pueden trabajar de forma discontinua y de forma continua, pueden trabajar en circuito abierto o circuito cerrado. (Martínez P. 2011).

Forma discontinua: cuando el molino se recarga de material y se cierra para hacerlo girar, terminada esta operación, el molino se abrirá para a continuación separar el mineral de los cuerpos molturantes. Esta forma de trabajar se utiliza en molinos pequeños de laboratorio.(Martínez P. 2011).

Forma continua: El molino se alimenta de forma continua por un extremo y simultáneamente se va descargando el mineral molido por el otro extremo (o por el centro según el molino). La operación únicamente se detendrá para trabajos de mantenimiento o recarga de los cuerpos molturantes. En la industria minera y producción de áridos, se trabaja siempre de forma continua. (Martínez P. 2011).

Los medios de molienda efectúan movimientos de cascada y catarata (Fig. 6). El primero de ellos se aplica al rodado de las bolas de la parte superior hacia la base del montón, y el segundo al lanzamiento de las bolas por el aire hasta la punta del montón. (Alcántara Valladares J.R., 2008) (Martínez P. 2011).

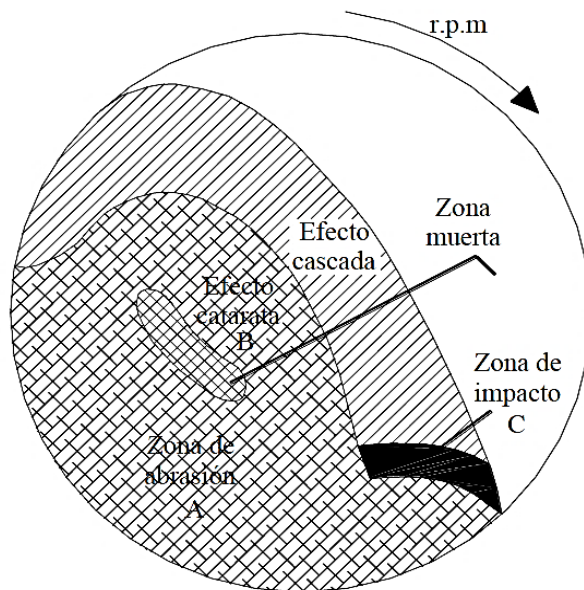


Figura 6. Comportamiento de una bola en un molino en carga.

Fuente: (Martínez P. 2011). Procesamiento de materiales, Universidad politécnica de Cartagena

Las Bolas Pueden estar fabricadas de acero de fundición, acero forjado o acero de al carbono y éste puede estar aleado al Cr-Mo, para ser resistentes al desgaste por impacto o aleado con Ni (Ni-hard), para ser resistentes a la abrasión (bolas de acero muy duro). En ocasiones no son esféricas, sino que toman formas cilíndricas, troncocónicas, etc., También se ha llegado a utilizar como cuerpos molturantes guijarros de 28 sílex o porcelana cuando se pretende evitar la contaminación del mineral a causa del desgaste del acero. Los molinos de bolas se emplean para moliendas finas. (Martínez P. 2011). Los molinos pueden estar caracterizados de acuerdo a su alimentación y a su forma de descarga; constituidos en la industria de acuerdo a la producción y material a moler, teniendo en cuenta el ritmo de trabajo al cual va a estar sometido. (Alcántara Valladares J.R., 2008)

3.2.5.2 Factores que afectan la eficiencia en la molienda de un molino de bolas

- Densidad de la pulpa de alimentación; debería ser lo más alta posible, pero garantizando un flujo fácil a través del molino
- Es esencial que las bolas estén cubiertas de una capa de mena, de tal manera que permanezcan sumergidas en su totalidad en el mineral a molturar.
- El contacto metal-metal disminuye la eficiencia.
- El rango de operación normal de los molinos de bolas es entre 65% a 80% de sólidos en peso.
- La carga de bolas y mineral equivalente al 50% del volumen del molino, resulta la capacidad máxima.
- Las bolas de tamaño mínimo capaces de moler el material alimentado, dan una eficiencia máxima.
- Los ciclos cerrados en los molinos de bolas ofrecen una mejor producción en cuanto a ciclos abiertos, aunque éstos últimos permiten en mayor control del proceso y del producto cuando no se requieren producciones considerables o de nivel industrial.
- En el trabajo en seco la eficiencia y capacidad se mejora con cargas ligeras de minerales. Así mismo se reduce los requisitos de potencia al disminuir dicha cantidad dentro del molino. (Alcántara Valladares J.R., 2008)

3.2.5.3 Parámetros del Molino

Los principales parámetros que van a caracterizar a un molino de bolas serán los siguientes:

3.2.5.3.1 Potencia exigida por un molino de bolas.

A pesar de un gran número de estudios en el ámbito de los planes de fractura no existe una fórmula conocida que prediga eficazmente la energía requerida necesaria para reducir un material desde un tamaño de partícula a otro menor. Sin embargo existen modelos empíricos, cada uno eficaz en su rango de trabajo, que usados pueden aproximarse mucho a los valores reales de molienda, es por ello que la decisión de la potencia a suministrar al equipo de molienda se ha fundamentado fuertemente en la experiencia, habiéndose desarrollado unas correlaciones empíricas muy útiles para predecir el comportamiento del equipo de molienda a partir de la incompleta teoría disponible. Una de las expresiones más usadas es la expresión de Bond, quien postuló en su ley que el trabajo que se requiere para formar partículas de un cierto tamaño D a partir de una alimentación muy grande es proporcional a la raíz cuadrada de la relación superficie/volumen del producto. (Alcántara Valladares J.R., 2008)

Llegando a la siguiente expresión:

$$(EC. 1) \quad P_{\text{Trituración}} = (m)(0,3162)(W_i)\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)$$

En la cual:

$P_{\text{Trituración}}$ = kWh por tonelada (907 kg) del material a pulverizar.

F = Tamaño del material de alimentación, mm

P = Tamaño del material pulverizado, mm

W_i = índice de trabajo de molienda de Bond (Tabla 2)

m = cantidad de material de alimentación, toneladas.

La utilidad práctica de la ley de Bond se fundamenta en la definición de un índice de trabajo, W_i (Tabla 2), como la energía total que se necesita para reducir una alimentación muy grande.

Índice de trabajo de molienda o molturabilidad

El índice de trabajo de molienda o de molturabilidad (W_i) da los KW que hay que aplicar para desmenuzar una tonelada corta (Tonelada corta =907 Kg) de material de tamaño de grano teóricamente ilimitado. El índice de trabajo de bond es válido para molinos de bolas que trabajen por vía húmeda. Para molienda vía seca el valor de (W_i) se ha de multiplicar por 1.30. (DUDA W. H. 1977.p.79)(Alcántara ValladaresJ.R.,2008)

W_i según Bond, para los materiales que se citan en la Tabla 2, son:

Tabla 2. Índices de trabajo de Molienda de Bond.

Material	Peso esp.	Índice de trabajo W_i
Bauxita	2.38	9.45
Clinker	3.09	13.49
Crudo para cemento	2.67	10.57
Arcilla	2.23	7.10
Arcilla calcinada	2.32	7.43
Carbón	1.63	11.37
Dolomita	2.82	11.31
Yeso natural	2.69	8.16
Caliza (para cemento)	2.68	10.18
Magnesita	5.22	16.80
Arenisca	2.68	11.53
Escorias de hogar	2.93	15.76
Escorias de horno alto	2.39	12.16

Fuente: (DUDA W. H. 1977.p.79)

3.2.5.3.2 Velocidad crítica del molino

Es aquella velocidad de giro mínima alcanzada por el molino, de forma que la fuerza centrífuga creada es suficiente para conseguir que las partículas queden adheridas a los revestimientos del molino. Es lógico que si queremos moler el mineral; la velocidad a la que gire el molino deberá estar por debajo de dicha velocidad crítica, normalmente

viene definida a través de un porcentaje de su velocidad crítica. (Martínez P. 2011)
(Alcántara Valladares J.R., 2008)

El criterio que se sigue para comparar la acción de las bolas en molinos de varios tamaños se basa en el concepto de velocidad crítica. Se trata de la velocidad teórica a la que la fuerza centrífuga ejercida sobre una bola en contacto con la cubierta del molino, a la altura de su trayectoria, es igual a la fuerza sobre ella debido a la gravedad. (Alcántara Valladares J.R., 2008). La expresión que nos proporciona el valor de la velocidad crítica, para un molino de bolas dado, es la siguiente:

Tabla 3. Velocidad crítica en función del diámetro del molino

Sistema métrico	Sistema inglés
$N_c = \frac{42,2}{\sqrt{D}} \quad (\text{EC. 2}^a)$	$N_c = \frac{76,6}{\sqrt{D}} \quad (\text{EC. 2b})$

Fuente: (Alcántara Valladares J.R., 2008)

Dónde:

N_c = Velocidad crítica, *r.p.m.*

D = Diámetro del molino, *m.* (medido internamente).

Las velocidades reales de los molinos van de 65 a 80% de su valor crítico. (Alcántara Valladares J.R., 2008) (Martínez P. 2011)

3.2.5.3.3 Masa de carga

El volumen de carga depende hasta cierto punto del tipo de molino. El cálculo se basa en determinar el tamaño del molino y el volumen de carga necesario para usar la potencia requerida de modo de obtener la producción propuesta. Necesitaremos conocer la fracción de carga del volumen del molino (J) y la densidad de la bola. Se ha

encontrado en la práctica que un valor óptimo de (J) para este tipo de molinos es mínima 28%, y por debajo del 50%. Así el peso de la bola se relaciona con el porcentaje de volumen de carga, manteniendo una relación de longitud (L) y diámetro (D) del molino L/D de 2,35:1, y para laboratorios son óptimas las relaciones de 1.6:1 – 1.8:1 (EC. 3), para esta forma cilíndrica del molino. (Alcántara Valladares J.R., 2008)

$$\text{Carga} = W = (\text{volumen del molino}) (\text{fracción de carga } J) (\text{densidad de la bola}) \quad (\text{EC } 3)$$

Para una molienda óptima el volumen del conjunto carga de molienda y material a moler deben constituir como mínimo aproximadamente 28% del volumen total del molino. Rescatando un 49% de ese conjunto que corresponde a volumen vacío, y el llenado óptimo de los molino de bolas debe ser tal que $h = 0,16D$. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

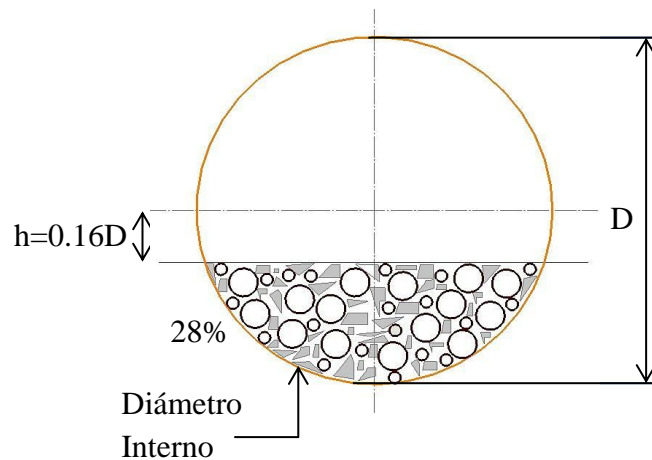


Figura 6. Vista transversal de la disposición de la carga, dentro del molino.

Fuente: Autor del proyecto

3.2.5.3.4 Dimensión de las bolas

Para solventar la necesidad de una alimentación calculada según el tamaño de la bola se han propuesto métodos que se relacionan con el material a triturar.

Estos desarrollos matemáticos partieron de hipótesis sobre la masa de la bola, y puestas a prueba experimentalmente. Los resultados son más efectivos para molinos

industriales, es por ello que se asignado un factor de 0.1 en prototipos a escala, pero aún así aunque no igual de efectivos son aceptables en laboratorios. (Alcántara Valladares J.R., 2008) (Ángulo García F. X., 2005).

Para un tamaño mínimo de bolas la expresión

$$(EC. 4) \quad D_b = 0.1 \sqrt{\frac{X_p \cdot E_t}{K \cdot n_r}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\sqrt{D_t}}}$$

Donde D_b es el diámetro de las bolas cm (in), X_p es el tamaño de partículas de alimentación más gruesas, E_t es el índice de trabajo del material alimentado, K es la constante de molibilidad, la cual es una medida de la velocidad de molienda del material en un molino particular de bolas. El principal propósito del estudio de la molibilidad consiste en evaluar el tamaño y el tipo de molino que se requiere para producir un tonelaje específico, y las necesidades de energía para la molienda. Así para un molino de bolas es 143 (S. métrico) y 200 (S. inglés), n_r es la velocidad, por ciento de la velocidad crítica, ρ_s es la gravedad específica o densidad relativa del material a triturar, D_t es el diámetro del tambor del molino m (ft). (Alcántara Valladares J.R., 2008) (Ángulo García F. X., 2005).

3.2.5.3.5 Dimensiones del molino teniendo en cuenta como parámetro la Potencia

Se tomará como referencia la expresión de $DAWN = KW$ la cual agrega un factor de corrección de 0,284.

$$(EC. 5) \quad KW = 0,284DAWN$$

Donde

D = diámetro del molino, dentro del emplacado (interno del tambor) en metros (m).

$A = (1,073 - J)$; donde J es la fracción de carga del volumen del molino.
W = peso de bolas y material en Toneladas (Ton).
N = velocidad del molino.

Esta expresión se ha ido desarrollando en la experiencia por el uso en la industria con el paso de los años. Una de las empresas que aporta en el uso y desarrollo de esta expresión, es SBM® - Shibang Machinery Company empresa china que se dedica a la producción de equipos mineros y prestación de servicios para proyectos de investigación minera. (SBM® 2014)(Alcántara Valladares J.R., 2008)

3.3 DISEÑO DE FLECHAS

Una *flecha* es un elemento rotatorio, por lo general de sección transversal circular, que se emplea para transmitir potencia o movimiento. Ella constituye el eje de rotación u oscilación de elementos como engranes, poleas, volantes de inercia, manivelas, catarinas y miembros similares y, además, controla la geometría de su movimiento. Un *eje* es un elemento no giratorio que no transmite par de torsión que se utiliza para soportar ruedas rotatorias, poleas y elementos parecidos. El eje de un automóvil no es un eje verdadero. El término es un remanente de la era de caballo y la calesa, cuando las ruedas giraban sobre elementos no rotatorios. Un eje no giratorio puede diseñarse con facilidad y analizarse como una viga estática, pero no justifica la atención especial que se le da en este capítulo a los ejes giratorios que están sometidos a carga por fatiga. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p. 348)

3.3.1 Configuración del Eje

La configuración general de un eje para acomodar los elementos que lo conforman, por ejemplo, engranes, cojinetes y poleas, debe especificarse en los primeros pasos del proceso de diseño para poder realizar un análisis de fuerzas de cuerpo libre y para

obtener diagramas de momento cortante. Por lo general, la geometría de un eje es la de un cilindro escalonado. El uso de hombros o resaltos constituye un medio excelente para localizar en forma axial los elementos del eje y para ejecutar cualquier carga de empuje necesaria. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p. 349)

3.3.1.1 Materiales de ejes

La deflexión no se ve afectada por la resistencia sino por la rigidez, representada por el módulo de elasticidad, que es esencialmente constante en todos los aceros. Por esa razón, la rigidez no puede controlarse mediante decisiones sobre el material, sino sólo por decisiones geométricas. La resistencia necesaria para soportar esfuerzos de carga afecta la elección de los materiales y sus tratamientos. Muchos ejes están hechos de acero de bajo carbono, acero estirado en frío o acero laminado en caliente. Por lo general, los ejes no requieren endurecimiento superficial a menos que sirvan como un recubrimiento real en una superficie de contacto. Las aleaciones de acero típicas para tratamiento térmico son ANSI 1340-50, 3140-50, 4140, 4340, 5140 y 8650. Las propiedades del eje dependen localmente de su historia: trabajo en frío, formado en frío, laminado de los rasgos del filete, tratamiento térmico, incluyendo el medio de temple, agitación y régimen de templado. Características que se pueden observar de la (Tabla 4) (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p. 348)

Tabla 4a. Resistencias mínimas determinísticas a la tensión y a la fluencia ASTM de algunos aceros laminados en caliente (HR) y estirados en frío (CD)

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS núm.	SAE y/o AISI núm.	Procesamiento	Resistencia a la tensión, MPa (kpsi)	Resistencia a la fluencia, MPa (kpsi)	Elongación en 2 pulg, %	Reducción en área, %	Dureza Brinell
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011. P. 1020)

Tabla 4b. Resultados de ensayos a la tensión de algunos metales

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)					Resistencia a la deformación, exponente m	Resistencia a la fractura σ_f
			Fluencia S_y , MPa (kpsi)	Última S_u , MPa (kpsi)	A la fractura, σ_B , MPa (kpsi)	Coficiente σ_0 , MPa (kpsi)			
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1) [†]	620 (90.0)	0.25	1.05	
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130) [†]	992 (144)	0.14	0.49	
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106) [†]	758 (110)	0.24	0.85	
1045	Acero	TyR 600°F	1 520 (220)	1 580 (230)	2 380 (345)	1 880 (273) [†]	0.041	0.81	
4142	Acero	TyR 600°F	1 720 (250)	1 930 (210)	2 340 (340)	1 760 (255) [†]	0.048	0.43	
303	Acero inoxidable	Recocido	241 (35.0)	601 (87.3)	1 520 (221) [†]	1 410 (205)	0.51	1.16	
304	Acero inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1 600 (233) [†]	1 270 (185)	0.45	1.67	
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2) [†]	620 (90)	0.28	0.10	
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3) [†]	689 (100)	0.15	0.18	
7075	Aleación de aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102) [†]	882 (128)	0.13	0.18	

[†]Los valores se tomaron de una o dos calotas y se considera que pueden obtenerse usando especificaciones de compra. La deformación por fractura puede variar hasta en 100%.

[†]Valor derivado.

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011. P. 1020)

3.3.1.2 Diseño de ejes para el esfuerzo

No es necesario evaluar los esfuerzos en todos los puntos de un eje; es suficiente hacerlo en unas cuantas ubicaciones potencialmente críticas. Por lo general, estas ubicaciones se localizan en la superficie exterior, en ubicaciones axiales donde el momento flexionante es grande, donde el par de torsión está presente y donde existen concentraciones de esfuerzo. Los momentos flexionantes sobre un eje pueden determinarse mediante diagramas de cortante y momento flexionante. Los momentos resultantes se obtienen al sumar momentos como vectores en los puntos de interés a lo largo del eje. Un momento flexionante constante producirá un momento completamente reversible sobre un eje giratorio, como un elemento de esfuerzo específico alternará de compresión a tensión en cada revolución del eje. El esfuerzo normal debido a los momentos flexionantes será mayor sobre las superficies exteriores. En situaciones donde un cojinete se localiza en el extremo del eje, con frecuencia los esfuerzos cerca del cojinete no son críticos puesto que el momento flexionante es pequeño. Los esfuerzos axiales sobre los ejes, debidos a componentes axiales transmitidos a través de engranes helicoidales o cojinetes ahusados de rodillo, casi siempre son despreciables en comparación con el esfuerzo de momento flexionante. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011. P. 354)

3.3.1.3 Esfuerzos en ejes

Los esfuerzos de flexión, torsión o axiales pueden estar presentes tanto en componentes medios como en alternantes. Algunas veces es conveniente adaptar las ecuaciones específicamente para aplicaciones de ejes. En general, las cargas axiales son comparativamente muy pequeñas en ubicaciones críticas donde dominan la flexión y la

torsión, por lo que pueden dejarse fuera de las siguientes ecuaciones. Los esfuerzos fluctuantes debidos a la flexión y la torsión están dados por

$$(EC. 6) \quad \sigma_a = K_f \frac{M_a c}{I} \quad \sigma_m = K_f \frac{M_m c}{I}$$

$$(EC. 7) \quad \tau_a = K_{fs} \frac{T_a c}{J} \quad \tau_m = K_{fs} \frac{T_m c}{J}$$

Donde M_m y M_a son los momentos flexionantes medio y alternante, T_m y T_a son los pares de torsión medio y alternante, y K_f y K_{fs} son los factores de concentración del esfuerzo por fatiga de la flexión y la torsión, respectivamente. Si se supone un eje sólido con sección transversal redonda, pueden introducirse términos geométricos apropiados para c , I y J , lo que resulta en

$$(EC. 8) \quad \sigma_a = K_f \frac{32M_a}{\pi d^3} \quad \sigma_m = K_f \frac{32M_m}{\pi d^3}$$

$$(EC. 9) \quad \tau_a = K_{fs} \frac{16T_a}{\pi d^3} \quad \tau_m = K_{fs} \frac{16T_m}{\pi d^3}$$

Cuando se combinan estos esfuerzos de acuerdo con la teoría de falla por energía de distorsión, los esfuerzos de von Mises para ejes giratorios, redondos y sólidos, sin tomar en cuenta las cargas axiales, están dados por (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011. P. 356)

$$(EC. 10) \quad \sigma'_a = (\sigma_a^2 + 3\tau_a^2)^{1/2} = \left[\left(\frac{32K_f M_a}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_a}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$(EC. 11) \quad \sigma'_m = (\sigma_m^2 + 3\tau_m^2)^{1/2} = \left[\left(\frac{32K_f M_m}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Los factores de concentración del esfuerzo se consideran opcionales para los componentes medios con materiales dúctiles, debido a la capacidad de éstos de fluir localmente en la discontinuidad. Estos esfuerzos medios y alternantes equivalentes pueden evaluarse usando una curva de falla apropiada sobre el diagrama de Goodman modificada (vea la Fig. 8 y Fig. 9). Por ejemplo, el criterio de falla por fatiga de la línea de Goodman (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p. 356) es:

$$(EC.12) \quad \frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}$$

la sustitución de σ'_a y σ'_m en las ecuaciones 10 y 11 resulta en

(EC. 13)

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

Para propósitos de diseño, también es deseable resolver la ecuación para el diámetro.

Esto resulta:

(EC.14)

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

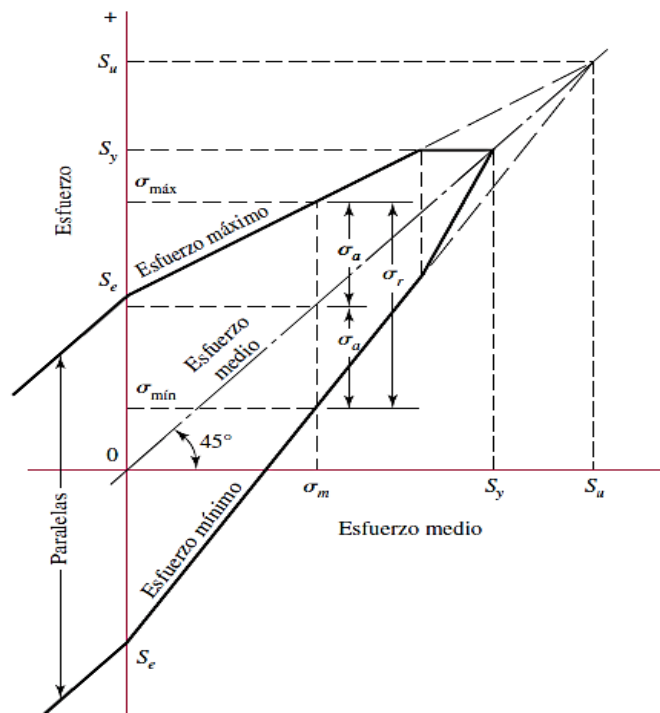


Figura 7. Diagrama de Goodman modificado que muestra todas las resistencias y los valores límite de cada una de las componentes del esfuerzo para un esfuerzo medio particular

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011. P. 295)

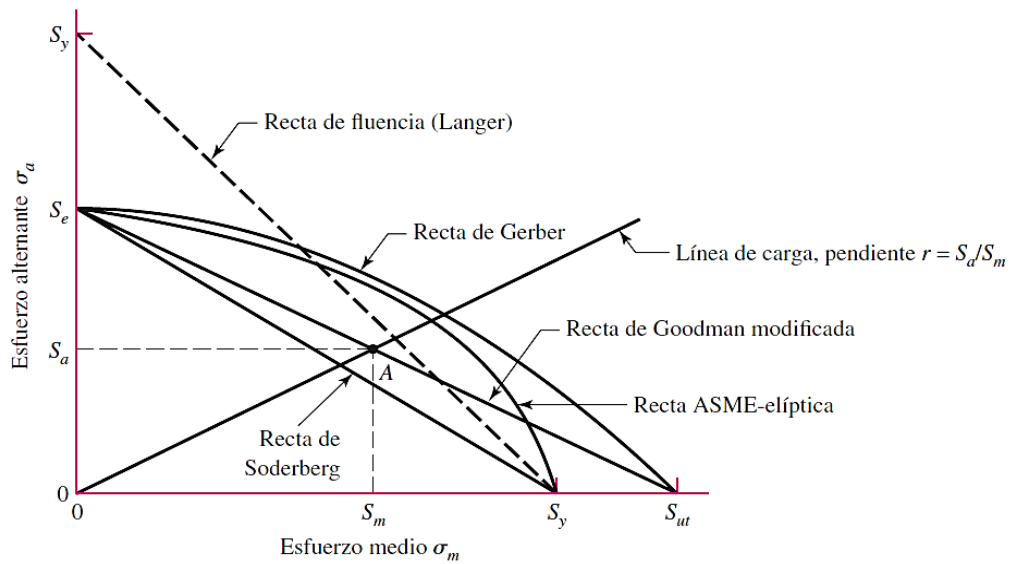


Figura 8. Diagrama de fatiga donde se proporcionan varios criterios de falla.

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011. P. 296)

Para cada criterio, los puntos en o “arriba” de la recta respectiva indican falla. Por ejemplo, un punto A en la recta de Goodman proporciona la resistencia S_m como el valor límite de σ_m correspondiente a la resistencia S_a , la cual, emparejada con σ_m , es el valor límite de σ_a . (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011. P. 296)

Se pueden obtener expresiones similares para cualquiera de los criterios de falla comunes mediante la sustitución de los esfuerzos de von Mises en cualquiera de los criterios de falla. Las ecuaciones resultantes para varias de las curvas de falla usadas comúnmente se resumen a continuación. Los nombres que se dan a cada conjunto de ecuaciones identifican la teoría de falla significativa, seguida por el nombre de un lugar geométrico de falla por fatiga. Por ejemplo, ED-Gerber indica que los esfuerzos se combinan mediante la teoría de distorsión (ED), y que para la falla por fatiga se usa el criterio de Gerber. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 356)

ED-Goodman

(EC. 15)

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

(EC.16)

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

ED-Gerber

(EC.17)
$$\frac{1}{n} = \frac{8A}{\pi d^3 S_e} \left\{ 1 + \left[1 + \left(\frac{2BS_e}{AS_{ut}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

(EC.18)
$$d = \left(\frac{8nA}{\pi S_e} \left\{ 1 + \left[1 + \left(\frac{2BS_e}{AS_{ut}} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

Donde

$$A = \sqrt{4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2}; \quad B = \sqrt{4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2}$$

ED-ASME elíptica

$$(EC.19) \quad \frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_{fs} M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$(EC.20) \quad d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left[4 \left(\frac{K_f M_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_a}{S_e} \right)^2 + 4 \left(\frac{K_{fs} M_m}{S_y} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{fs} T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3}$$

ED-Soderberg

(EC.21)

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

(EC. 22)

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

Siempre es necesario considerar la posibilidad de falla estática en el primer ciclo de falla. El criterio de Soderberg evita de manera inherente la fluencia, como puede observarse en su curva de falla que se mantiene conservadoramente dentro de la línea de fluencia (Langer). El criterio ASME elíptico también toma en cuenta la fluencia, pero no es completamente conservador a lo largo de todo su rango. Esto es evidente al observar que cruza la línea de fluencia. Los criterios de Gerber y Goodman modificado no protegen contra la fluencia, por lo que requieren una verificación adicional de este aspecto. Para tal propósito, se calcula el esfuerzo máximo de von Mises. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 358)

$$(EC. 23) \quad \sigma'_{max} = [(\sigma_m + \sigma_a)^2 + 3(\tau_m + \tau_a)^2]^{1/2}$$

$$= \left[\left(\frac{32K_f(M_m + M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs}(T_m + T_a)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Para verificar la fluencia, este esfuerzo máximo de von Mises se compara como siempre con la resistencia a la fluencia.

$$(EC. 24) \quad n_y = \frac{S_y}{\sigma'_{max}}$$

Para una verificación rápida y conservadora, se puede obtener una estimación de $\sigma_{m\acute{a}x}$ simplemente al sumar σ_a y σ_m . El valor de $(\sigma_a + \sigma_m)$ siempre será mayor o igual que $\sigma_{m\acute{a}x}$, por lo cual será conservador. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 358)

3.3.2 Velocidades críticas de ejes

Cuando un eje gira, la excentricidad ocasiona una deflexión debida a la fuerza centrífuga que se resiste por la rigidez a flexión del eje EI . Siempre y cuando las deflexiones sean pequeñas, no se ocasiona ningún daño. Sin embargo, otro problema potencial se llama *velocidades críticas*: a ciertas velocidades el eje es inestable, y las deflexiones se incrementan sin un límite superior. Por fortuna, aunque la forma de la deflexión dinámica se desconoce, mediante una curva de deflexión estática se obtiene una estimación excelente de la velocidad crítica. El eje, debido a su propia masa, tiene una velocidad crítica. La estimación de estas velocidades críticas (y sus armónicas) es una tarea del diseñador. Cuando la geometría es simple, como la de un eje de diámetro uniforme, simplemente apoyado, la tarea es fácil. Puede expresarse como: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 371)

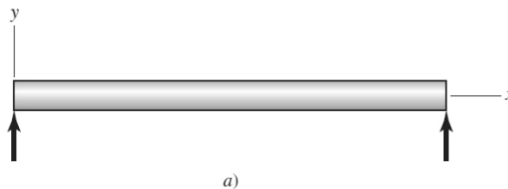
$$(EC. 25) \quad \omega_l = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} = \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{gEI}{A\gamma}}$$

Donde m es la masa por unidad de longitud, A el área de la sección transversal y γ el peso específico. En el caso de un ensamble de elementos, el método de Rayleigh para masas concentradas establece

$$(EC. 26) \quad \omega_l = \sqrt{\frac{g \sum w_i y_i}{\sum w_i y_i^2}}$$

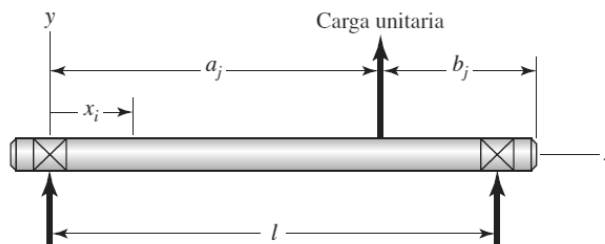
Donde w_i es el peso de la i -ésima ubicación y y_i es la deflexión en la ubicación del i -ésimo cuerpo. Se puede usar la ecuación 25 en el caso de la ecuación 26 dividiendo el eje en segmentos y colocando su fuerza del peso en el centroide del segmento como se muestra en la Figura 10

Figura 9. Eje de diámetro uniforme



Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p.371)

Figura 10. El coeficiente de influencia δ_{ij} es la deflexión en i , debida a una carga unitaria en j .



Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 201.p.371).

Para contrarrestar la complejidad mayor del detalle, se adopta un punto de vista útil. Puesto que el eje es un cuerpo elástico, se utilizan *coeficientes de influencia*, que son las deflexiones transversales en la ubicación i de un eje, debida a una carga unitaria en la ubicación j del eje. De la Tabla 5 se obtiene, para una viga simplemente apoyada con una sola carga unitaria. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011,p 372)

$$(EC. 27) \quad \delta_{ij} = \begin{cases} \frac{b_j x_i}{6EI l} (l^2 - b_j^2 - x_i^2) & x_i \leq a_i \\ \frac{a_j (l - x_i)}{6EI l} (2lx_i - a_j^2 - x_i^2) & x_i > a_i \end{cases}$$

Tabla 5. Cortante, momento y deflexión de vigas.
Apoyos simples, carga intermedia.

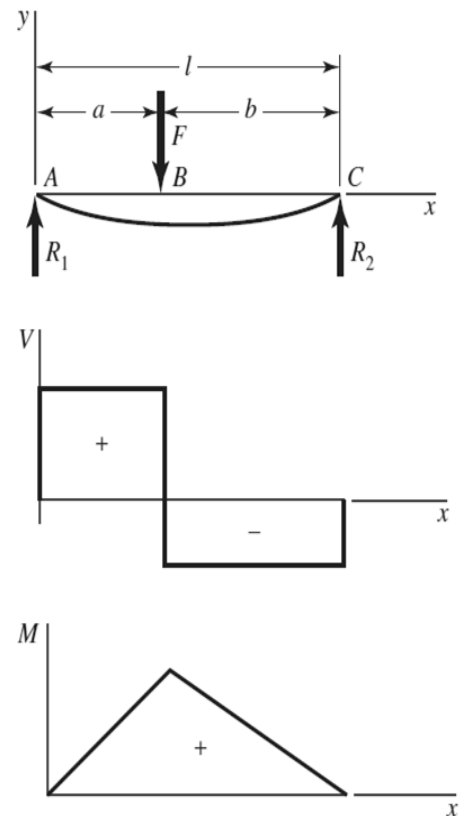
$$R_1 = \frac{Fb}{l} \quad R_2 = \frac{Fa}{l}$$

$$V_{AB} = R_1 \quad V_{BC} = -R_2$$

$$M_{AB} = \frac{Fbx}{l} \quad M_{BC} = \frac{Fa}{l}(l-x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fbx}{6EI} (x^2 + b^2 - l^2)$$

$$y_{BC} = \frac{Fa(l-x)}{6EI} (x^2 + a^2 - 2lx)$$



Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 995)

Tabla 6. Cortante, momento y deflexión de vigas. Apoyos simples cargas idénticas.

$$R_1 = R_2 = F \quad V_{AB} = F \quad V_{BC} = 0$$

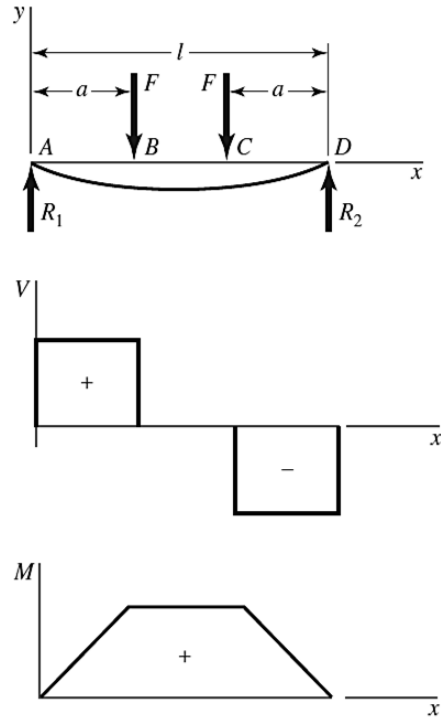
$$V_{CD} = -F$$

$$M_{AB} = Fx \quad M_{BC} = Fa \quad M_{CD} = F(l - x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fx}{6EI}(x^2 + 3a^2 - 3lx)$$

$$y_{BC} = \frac{Fa}{6EI}(3x^2 + a^2 - 3lx)$$

$$y_{\text{máx}} = \frac{Fa}{24EI}(4a^2 - 3l^2)$$



Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 997)

3.3.3 Factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Se ha visto que la muestra para el ensayo en máquina rotativa en el laboratorio para determinar los límites de resistencia a la fatiga se prepara con mucho cuidado y se ensaya bajo condiciones muy controladas. No es posible esperar que el límite de resistencia a la fatiga de un elemento mecánico o estructural iguale los valores que se obtuvieron en el laboratorio.

Algunas diferencias incluyen:

- *Material*: composición, base de falla, variabilidad.
- *Manufactura*: método, tratamiento térmico, corrosión superficial por frotamiento, acabado superficial, concentración de esfuerzo.
- *Entorno*: corrosión, temperatura, estado de esfuerzos, tiempos de relajación.
- *Diseño*: tamaño, forma, vida, estado de esfuerzos, concentración de esfuerzo, velocidad, rozamiento, excoiación. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 278)

Por lo tanto la ecuación de Marin se escribe:

$$(EC. 28) \quad S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

Dónde:

k_a = factor de modificación de la condición superficial

k_b = factor de modificación del tamaño

k_c = factor de modificación de la carga

k_d = factor de modificación de la temperatura

k_e = factor de confiabilidad

k_f = factor de modificación de efectos varios

S'_e = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria

S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

3.3.3.1 Factor de la condición superficial k_a

$$(EC. 29) \quad k_a = a S_{ut}^b$$

Tabla 7. Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin, ecuación 30

Acabado superficial	Factor a		Exponente b
	S_{ut} kpsi	S_{ut} MPa	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de la forja	39.9	272.	-0.995

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 280)

3.3.3.2 Factor de tamaño k_b

$$(EC. 30) \quad k_b = \begin{cases} (d/0.3)^{-0.107} = 0.879d^{-0.107} & 0.11 \leq d \leq 2 \text{ pulg} \\ 0.91d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ pulg} \\ (d/7.62)^{-0.107} = 1.24d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 282)

Para carga axial no hay efecto de tamaño, por lo cual $k_b = 1$

3.3.3.3 Factor de carga k_c

$$(EC. 31) \quad k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión}^{17} \end{cases}$$

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 282)

Nota: Use esto sólo para la carga por fatiga torsional. Cuando la torsión está combinada con otros esfuerzos, como la flexión, $k_c = 1$ y la carga combinada se maneja usando el esfuerzo de von Mises 5. Para la torsión pura, la energía de distorsión predice que (k_c) torsión = 0.577.

3.3.3.4 Factor de temperatura k_a

Tabla 8. Efecto de la temperatura de operación en la resistencia a la tensión del acero.

Temperatura, °C	S_T/S_{RT}	Temperatura, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1 000	0.698
550	0.672	1 100	0.567
600	0.549		

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 283)

(S_T = resistencia a la tensión a la temperatura de operación; S_{RT} = resistencia a la tensión a temperatura ambiente; $0.099 \leq \hat{\sigma} \leq 0.110$). Cuando se toma en cuenta la temperatura surgen dos tipos de problemas. Si se conoce el límite de la resistencia a la fatiga de una viga rotativa a temperatura ambiente entonces se emplea:

$$(EC. 32) \quad k_d = \frac{S_T}{S_{RT}}$$

3.3.3.5 Factor de confiabilidad k_e

$$(EC. 33) \quad k_d = 1 - 0.08z_a$$

Tabla 9. Factores de confiabilidad k_e correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del S_e

Confiabilidad, %	Variación de transformación z_a	Factor de confiabilidad k_e
50	0	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.326	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 285)

3.3.3.6 Factor de efectos varios k_f

Aunque el factor k_f tiene el propósito de tomar en cuenta la reducción del límite de resistencia a la fatiga debida a todos los otros efectos, en verdad significa un recordatorio que estos efectos se deben tomar en cuenta, porque los valores reales de k_f no siempre están disponibles. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 285)

3.3.4 Concentración del esfuerzo y sensibilidad a la muesca

Son muy limitadas las aplicaciones en las cuales los elementos de máquinas no presenten cambios en su sección transversal, puesto que estos sirven para sujeción de otros elementos y soporte de cargas. Cualquier discontinuidad en una parte de una máquina genera una alteración en la distribución de esfuerzos en las inmediaciones de la zona discontinua, que no son consideradas en las ecuaciones elementales de esfuerzos. Por ello es necesario emplear factores de concentración de esfuerzos K_t y K_f que se definen por medio de las siguientes ecuaciones. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 105)

$$(E.C. 34) \quad K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \quad K_{ts} = \frac{\tau_{max}}{\tau_0}$$

Donde K_t es para esfuerzos normales y K_{ts} es para esfuerzos cortantes. Dado que resulta difícil el cálculo de los esfuerzos nominales, se presentan a continuación gráficas experimentales que permiten una adecuada estimación:

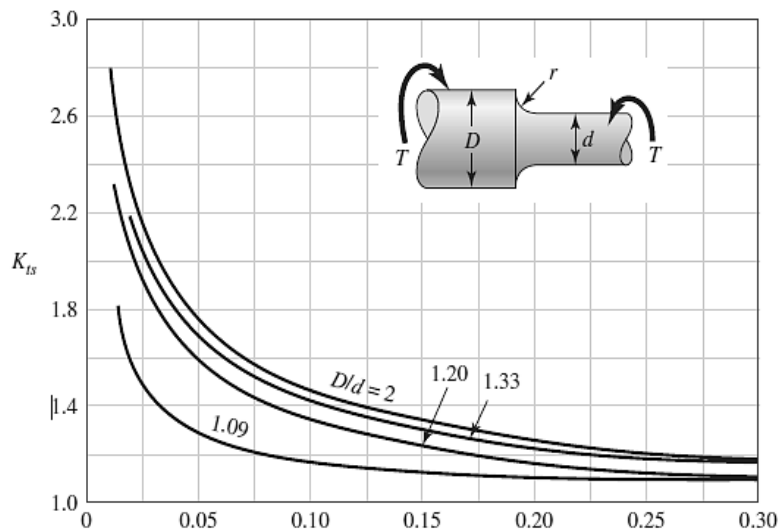


Figura 11. Gráficas de K_{ts} para eje redondo con filete en el hombro en torsión.
 $\tau_0 = Tc/J$, donde $c=d/2$ y $J = \pi d^4/32$.

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011).p 1008

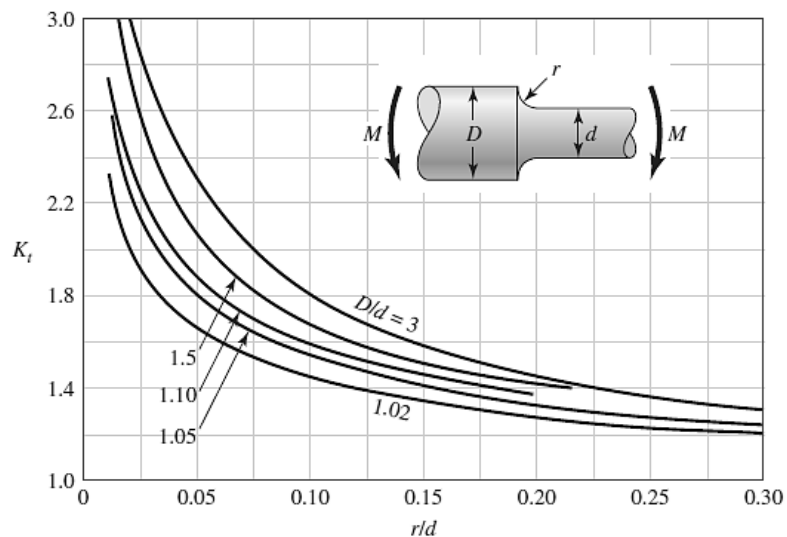


Figura 12. Gráficas de K_t para eje redondo con filete en el hombro en flexión.
 $\sigma_0 = Mc/I$, donde $c = d/2$ y $I = \pi d^4/64$.

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011).p 1008

Como no todos los materiales son completamente sensibles a las muescas, para ellos se utiliza un valor reducido de K_t , el cual es comúnmente llamado factor de concentración del esfuerzo por fatiga K_f , de ahí el subíndice f . Este se define mediante la siguiente ecuación.

$$(EC. 35) \quad K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad \text{o bien} \quad K_{fs} = 1 + q_{cortante}(K_{ts} - 1)$$

Donde q es la sensibilidad a las muescas del material, la cual se define como sigue.

$$(EC. 36) \quad q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

Donde \sqrt{a} llamada “constante de Neuber” se calcula de la siguiente manera para el caso del acero, con S_{ut} en kpsi.

$$(EC. 37) \quad \begin{aligned} a) \text{ para flexión o axial; } \sqrt{a}_{flexión} &= 0.245799 - 0.307794(10^2)S_{ut} \\ &+ 0.150874(10^{-4})S_{ut}^2 - 0.266978(10^{-7})S_{ut}^3 \\ b) \text{ para flexión o axial; } \sqrt{a}_{torsión} &= 0.190 - 2.51(10^{-3})S_{ut} \\ &+ 1.35(10^{-5})S_{ut}^2 - 2.67(10^{-8})S_{ut}^3 \end{aligned}$$

En el diseño de un eje muchas veces es necesario hacer una primera estimación sin conocer los valores definitivos, para el caso de los factores K_t y K_{ts} , se presenta siguiente Tabla.

Tabla 10. Estimación de primera estimación de K_t y K_{ts}

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)	2.2	3.0	—
Cuñero de patín o trapecoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 361)

3.4 SELECCIÓN DE COJINETES DE BOLAS.

Un cojinete de bolas es capaz de resistir cargas radiales y de empuje. Además, las cargas se pueden combinar.

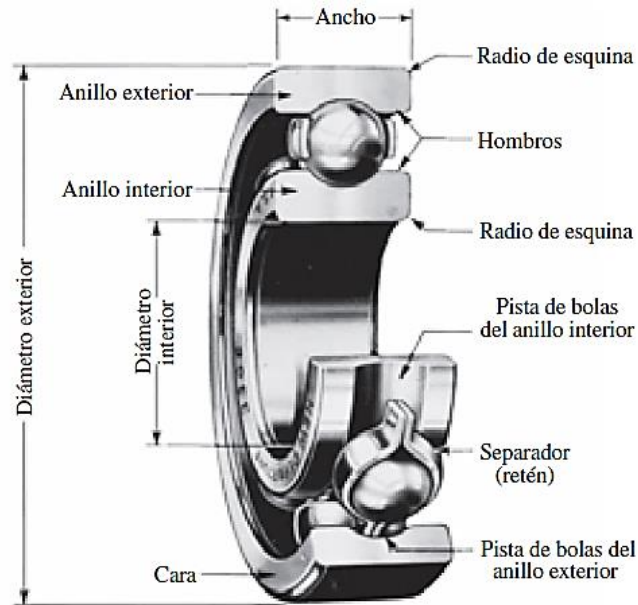


Figura 13. Nomenclatura de un cojinete de bolas

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 547)

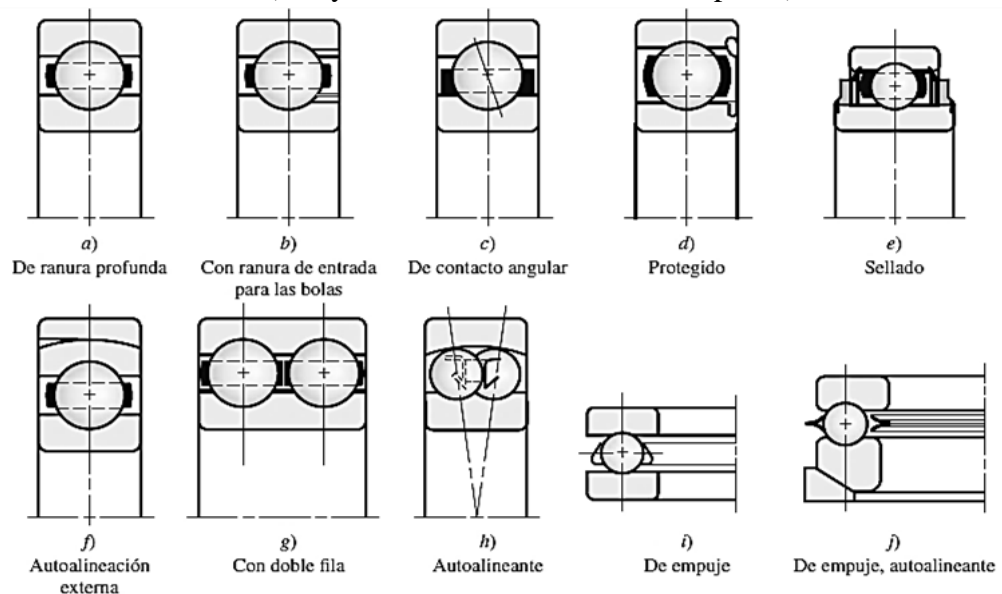


Figura 14. Tipos de cojinetes de bolas.

Fuente:(Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 547)

El término que comúnmente se emplea es *vida del cojinete*, que se aplica a cualquiera de las medidas que se mencionaron. Es importante darse cuenta que, como en todo tipo

de fatiga, la vida según se definió anteriormente es una variable estocástica y, como tal, tiene distribución y parámetros estadísticos asociados. La medida de la vida de un cojinete individual se define como el número total de revoluciones (u horas a una velocidad constante) de operación del cojinete hasta que se presente el criterio de falla. Bajo condiciones ideales, la falla por fatiga consiste en el descascarado de las superficies de soporte de la carga. La norma de la American Bearing Manufacturers Association (ABMA) establece que el criterio de falla es la primera evidencia de la fatiga. El criterio de fatiga de los laboratorios de la compañía Timken consiste en el descascarado o picadura de un área de 0.01 pulg². Asimismo, Timken también señala que la vida útil del cojinete se puede extender mucho más allá de este punto. Lo anterior es una definición operacional de la falla por fatiga de cojinetes de rodamiento. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 549)

La *vida nominal* es un término sancionado por la ABMA que emplean la mayoría de los fabricantes de cojinetes. La vida nominal de un grupo de cojinetes de bolas o de rodillos prácticamente idénticos se define como el número de revoluciones (u horas a una velocidad constante) que 90% de un grupo de cojinetes alcanza o excede, antes de que se desarrolle el criterio de falla. Los términos *vida mínima*, *vida L₁₀* y *vida B₁₀* también se utilizan como sinónimos de vida nominal. La vida nominal es la ubicación del décimo percentil de la distribución de revoluciones a la falla del grupo de cojinetes.

La *vida media (mediana)* es la vida del cincuentavo percentil de un grupo de cojinetes. El término *vida promedio* se ha empleado como sinónimo de la vida media, lo cual contribuye a la confusión. Cuando se prueban muchos grupos de cojinetes, el valor de la

vida media se encuentra entre 4 y 5 veces el valor de la vida L_{10} . (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 550)

A esta vida se le denomina como **clasificación de carga de catálogo** y se representa algebraicamente como C_{10} a fin de denotarla como el décimo percentil de la vida nominal de un cojinete particular en el catálogo. La cual puede expresarse como:

$$C_{10}(L_R n_R 60)^{1/a} = F_D (L_D n_D 60)^{1/a}$$

↑ clasificación de catálogo, lbf o kN
↑ vida nominal en horas
↑ velocidad nominal, rpm
↑ carga radial deseada, lbf o kN
↑ vida deseada, horas
↑ velocidad deseada, rpm

Despejando para C_{10} , se tiene:

$$(EC. 38) \quad C_{10} = F_D \left(\frac{L_D n_D 60}{L_R n_R 60} \right)^{1/a}$$

3.4.1 Relación carga-vida-confiabilidad

$$(EC. 39) \quad C_{10} = a_f F_D \left[\frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0) \left(\ln \frac{1}{R_D} \right)^{\frac{1}{b}}} \right]^{\frac{1}{a}} ; \quad (EC. 37) \quad X_D = \frac{(L_D n_D 60)}{L_R}$$

Donde:

X_D , corresponde a las veces que se está aumentando la vida nominal. (EC. 39)

R_D , confiabilidad, por encima de 0,90.

Los factores θ , x_0 y b , parámetros de Weibull de vidas nominales, propias de cada fabricante.

El factor a , para cojinetes de bolas es igual a 3. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 550)

a_f , corresponde al factor de aplicación de carga. (Tabla 12)

Tabla 11. Recomendaciones de vida de cojinetes para varias clases de maquinaria.

Tipo de aplicación	Vida, kh
Instrumentos y aparatos de uso poco frecuente	Hasta 0.5
Motores de aeronaves	0.5-2
Máquinas de operación corta o intermitente, donde la interrupción del servicio resulta de poca importancia	4-8
Máquinas de servicio intermitente donde una operación confiable es de gran importancia	8-14
Máquinas para servicio de 8 h, que no siempre se usan completamente	14-20
Máquinas para servicio de 8 h, que se utilizan plenamente	20-30
Máquinas para servicio continuo las 24 h	50-60
Máquinas para un servicio continuo de 24 h, donde la confiabilidad es de suma importancia	100-200

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 559)

Tabla 12. Factores de aplicación de carga.

Tipo de aplicación	Factor de carga
Engranajes de precisión	1.0-1.1
Engranajes comerciales	1.1-1.3
Aplicaciones con sellos deficientes en los cojinetes	1.2
Maquinaria sin impactos	1.0-1.2
Maquinaria con impactos ligeros	1.2-1.5
Maquinaria con impactos moderados	1.5-3.0

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 559)

3.5 TRANSMISIÓN DE POTENCIA POR ENGRANES.

3.5.1. Tipos de engranes.

Los *engranes rectos*, que se ilustran en la Figura 15, tienen dientes paralelos al eje de rotación y se emplean para transmitir movimiento de un eje a otro eje paralelo. De todos los tipos, el engrane recto es el más sencillo, razón por la cual se usará para desarrollar las relaciones cinemáticas básicas de la forma de los dientes.

Los *engranes helicoidales*, que se muestran en la Figura 16, poseen dientes inclinados con respecto al eje de rotación, y se utilizan para las mismas aplicaciones que los

engranes rectos y, cuando se utilizan en esta forma, no son tan ruidosos, debido al engranado más gradual de los dientes durante el acoplamiento. Asimismo, el diente inclinado desarrolla cargas de empuje y pares de flexión que no están presentes en los engranes rectos. En ocasiones, los engranes helicoidales se usan para transmitir movimiento entre ejes no paralelos.

Los *engranes cónicos*, como los de la Figura 17, que presentan dientes formados en superficies cónicas, se emplean sobre todo para transmitir movimiento entre ejes que se intersecan. En la Figura se exhiben en realidad *engranes cónicos de dientes rectos*. Los *engranes cónicos en espiral* se cortan de manera que el diente no sea recto, sino que forme un arco circular. Los *engranes hipoides* son muy similares a los engranes cónicos en espiral, excepto por el hecho de que los ejes están desplazados y no se intersecan.

El *tornillo sinfín* o de *gusano*, que se muestra en la Figura 18, representa el cuarto tipo de engrane básico. Como se indica, el gusano se parece a un tornillo. El sentido de rotación del gusano, también llamado corona de tornillo sinfín, depende del sentido de rotación del tornillo sinfín y de que los dientes de gusano se hayan cortado a la derecha o a la izquierda. Los engranajes de tornillo sinfín también se hacen de manera que los dientes de uno o de ambos elementos se envuelvan de manera parcial alrededor del otro. Dichos engranajes se llaman engranajes de *envolvente simple* o *doble*. Los engranajes de sinfín se emplean sobre todo cuando las relaciones de velocidad de los dos ejes son muy altas, digamos, de 3 o más. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 648.)

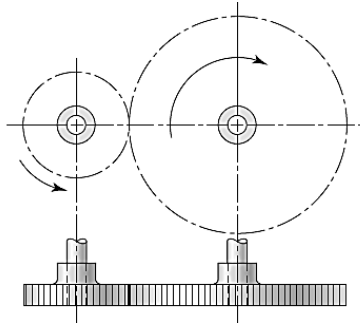


Figura 15. Engranos rectos

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 648)

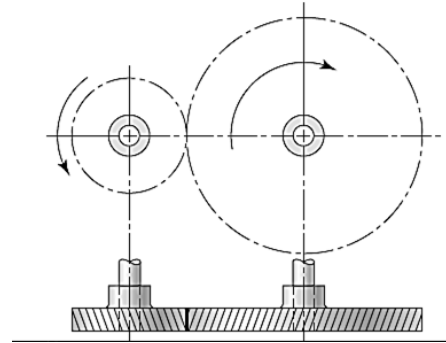


Figura 16. Engranos helicoidales

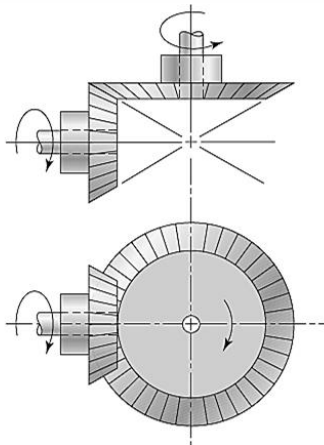


Figura 17. Engranos cónicos

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 649)

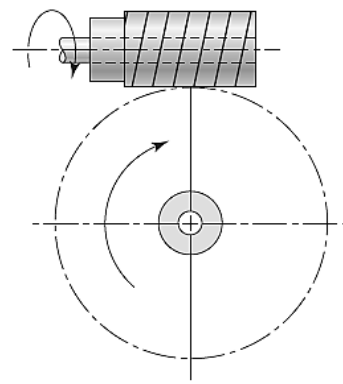


Figura 18. Engrane de Tornillo Sinfín.

3.5.1.1 Nomenclatura.

La terminología de los dientes de engranes rectos se indica en la Figura 19.

El *círculo de paso* es un círculo teórico en el que por lo general se basan todos los cálculos; su diámetro es el *diámetro de paso*. Los círculos de paso de un par de engranes acoplados son tangentes entre sí.

Un *piñón* es el menor de dos engranes acoplados; a menudo, el mayor se llama *rueda*.

El *paso circular* p es la distancia, medida sobre el círculo de paso, desde un punto en un diente a un punto correspondiente en un diente adyacente. De esta manera, el paso circular es igual a la suma del *espesor del diente* y del *ancho del espacio*.

El *módulo* m representa la relación del diámetro de paso con el número de dientes. La unidad de longitud que suele emplearse es el milímetro. El módulo señala el índice del tamaño de los dientes en unidades SI.

El *paso diametral* P está dado por la relación del número de dientes en el engrane respecto del diámetro de paso. Por lo tanto, es el recíproco del módulo. Debido a que el paso diametral se utiliza sólo con unidades del sistema inglés, se expresa en dientes por pulgada.

La *cabeza* a se determina por la distancia radial entre la *cresta* y el círculo de paso. La *raíz* b equivale a la distancia radial desde el *fondo* hasta el círculo de paso. La *altura*, o *profundidad total* h , es la suma de la cabeza y la raíz.

El *círculo del claro* es un círculo tangente al círculo de la raíz del engrane acoplado. El *claro* c está dado por la cantidad por la que la raíz en un engrane dado excede la cabeza de su engrane acoplado.

El *huelgo* se determina mediante la cantidad por la cual el ancho del espacio de un diente excede el grosor o espesor del diente de acoplamiento medido en los círculos de paso. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 649)

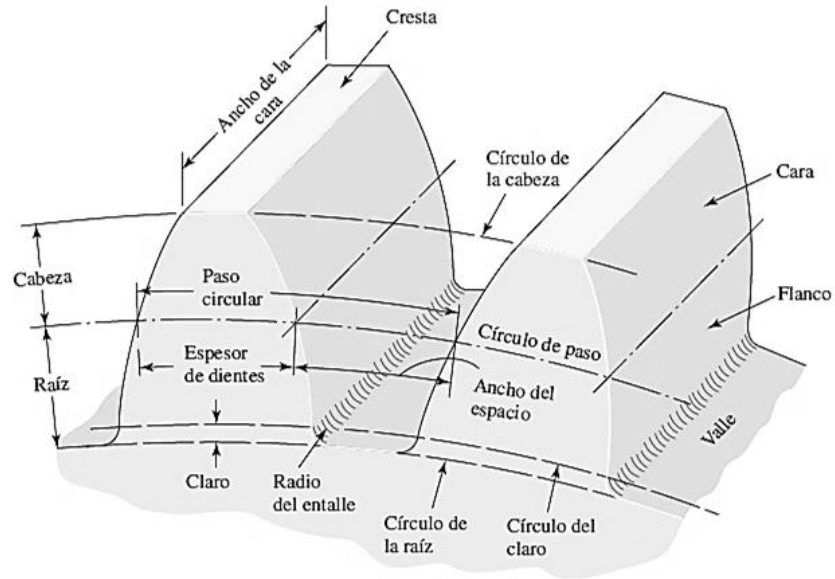


Figura 19. Nomenclatura de los dientes de engranes rectos.
 Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 650)

(EC. 40)

$$P = \frac{N}{d}$$

(EC. 41)

$$M = \frac{d}{N}$$

(EC. 42)

$$p = \frac{\pi d}{N} = \pi m$$

(EC. 43)

$$pP = \pi$$

Donde:

P = paso diametral, dientes por pulgada

N = número de dientes

d = diámetro de paso, pulg

m = módulo, mm

d = diámetro de paso, mm

p = paso circular

Nota: Para referirnos en cualquier parámetro al engrane conductor (Piñón) lo haremos con el subíndice (P) y en el caso opuesto, al engrane conducido (Rueda) con el subíndice (G).

Por lo tanto la distancia entre centros (C), será

$$(EC. 44) \quad C = \frac{d_P + d_G}{2}$$

Las distancias de la cabeza (a) y la raíz (b) para dientes intercambiables estándar son, como se aprenderá más adelante, $1/P$ y $1.25/P$, respectivamente.

$$(EC. 45) \quad a = \frac{1}{P}$$

$$(EC. 46) \quad b = \frac{1.25}{P}$$

De esta manera el espesor del diente (t) será:

$$(EC. 47) \quad t = \frac{P}{2}$$

Y el radio del círculo base (r_b), está dado por:

$$(EC. 48) \quad r_b = r \cos \phi$$

Donde ϕ , es el ángulo de la línea de presión y r es el radio de paso.

3.5.2 TRENES DE ENGRANES.

Considere un piñón 2 que impulsa un engrane 3. La velocidad del engrane impulsado es:

$$(EC. 49) \quad n_3 = \left| \frac{N_2}{N_3} n_2 \right| = \left| \frac{d_2}{d_3} n_2 \right|$$

Donde

n = revoluciones o rpm

N = número de dientes

d = diámetro de paso

nota: La ecuación (49) se aplica a cualquier engranaje, sin importar si los engranes son rectos, helicoidales, cónicos o de tornillo sinfín. Los signos de valor absoluto se utilizan para tener libertad completa al elegir direcciones positivas y negativas. En el caso de engranes rectos y helicoidales paralelos, las direcciones suelen corresponder a la regla de la mano derecha y son positivas para la rotación en sentido contrario a las manecillas del reloj. Las direcciones rotacionales son un poco más difíciles de deducir en. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 672)

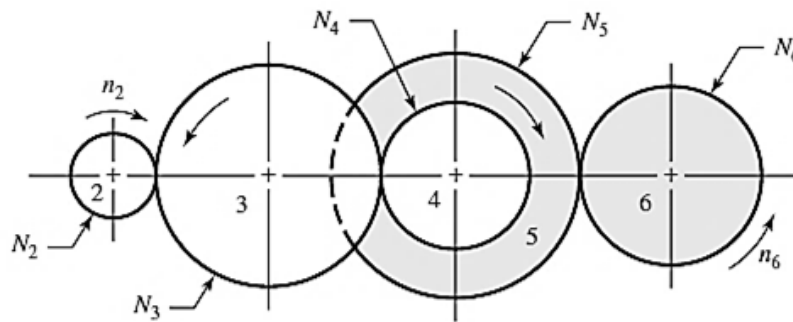


Figura 20. Tren de engranes.
Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 672)

El tren de engranes de la Figura 19 se compone de cinco engranes. La velocidad del engrane 6 corresponde a:

$$(EC. 50) \quad n_6 = - \frac{N_2 N_3 N_5}{N_3 N_4 N_6} n_2$$

De aquí se deduce que el engrane 3 es un engrane secundario libre o loco, que su número de dientes se cancela en la ecuación (a) y que, por lo tanto, sólo afecta la dirección de rotación del engrane 6. Además, se nota que los engranes 2, 3 y 5 son impulsores, en tanto que los engranes 3, 4 y 6 son elementos impulsados. Se define el *valor del tren e* como:

$$(EC. 51) \quad e = \frac{\text{producto del número de dientes de los motrices}}{\text{producto del número de dientes de los impulsados}}$$

En ocasiones es deseable que el eje de entrada y el de salida de un tren de engranes compuesto de dos etapas estén en línea. Esta configuración se denomina *tren de engranes compuesto inverso*. Esto requiere que las distancias entre los ejes sean las mismas para ambas etapas del tren, lo que se agrega a la complejidad de la tarea del diseño. La limitante de la distancia es: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 674)

$$(EC. 52) \quad d_2/2 + d_3/2 = d_4/2 + d_5/2$$

El paso diametral relaciona los diámetros y los números de dientes, $P = N/d$. Al reemplazar todos los diámetros se tiene

$$(EC. 53) \quad N2/(2P) + N3/(2P) = N4/(2P) + N5/(2P)$$

Si se supone un paso diametral constante en ambas etapas, tenemos la condición geométrica establecida en términos del número de dientes:

$$(EC. 54) \quad N2 + N3 = N4 + N5$$

Como guía aproximada, se puede obtener un valor del tren de hasta 10 a 1 con un par de engranes. Se pueden conseguir mayores relaciones en menor espacio y con menores problemas dinámicos al combinar pares adicionales de engranes. Un tren de engranes compuesto de dos etapas puede ofrecer un valor del tren de hasta 100 a 1. (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011).p 674

La fuerza útil transmitida por el engranaje se le llama fuerza tangencial o carga transmitida W_t , la cual se halla a partir de la potencia (HP o KW) y velocidad (rpm) (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p 687):

Para el sistema inglés:

$$(EC. 55) \quad W_t = 33000 \frac{H}{V}; \quad \text{con } V = \pi d n$$

Donde

W_t =carga transmitida, lbf

H= potencia, HP

V= velocidad de la línea de paso, Pie/min

d= diámetro del engrane, pulg

n= velocidad del engrane, rpm

Para el Sistema Internacional:

$$(EC. 56) \quad W_t = \frac{60000H}{\pi dn}$$

Donde

W_t = carga transmitida, KN

H = potencia, KW

d = diámetro del engrane, mm

n = velocidad del engrane, rpm

3.6 ARCILLA.

Se da nombre de arcilla a las partículas sólidas con tamaño menor de 0.005 mm que al ser mezcladas con agua tienen la propiedad de volverse plásticas, dúctiles y maleables. La arcilla es un silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, frágil en seco y con gran capacidad de absorción (ASOGUAYABAL. 2014). El gran agente de transformación ha sido el agua, la cual al contener CO₂ y entrar en contacto con la roca feldespática, disuelve y se lleva el K₂O y parte de la sílice. La sílice y la alúmina restantes, después de un tiempo de contacto con la humedad se hidratan y se transforman en arcilla. (Velilla Díaz W. 2008).

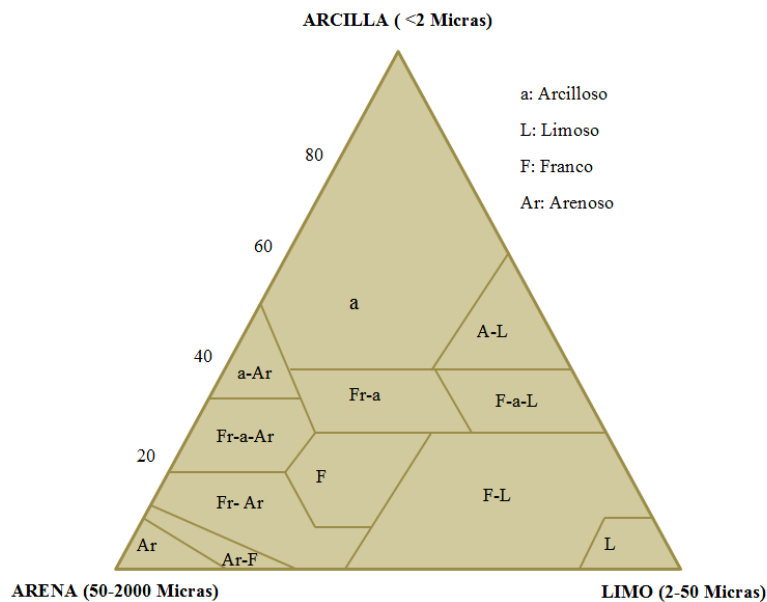


Figura 21. Esquema de clasificación textural del suelo
Fuente: (ASOGUAYABAL. 2014).

3.6.1 Arcilla Esmectita o Montmorillonita

Se caracteriza por una composición química inconstante, es un mineral que es soluble en ácidos y que tiende a dilatarse o expandirse si se expone al agua. La montmorillonita se forma a través de la alteración de los minerales de silicatos en condiciones alcalinas, en las rocas ígneas básicas, tales como ceniza volcánica que puede acumularse en océanos. Es un componente de la bentonita utilizado generalmente en los fluidos de perforación. Para cimentación de construcciones es uno de los terrenos en los que se deben tomar más precauciones debido a su carácter expansivo. También posee propiedades Tixotrópicas, lo que permite su utilización como lodos de perforación. (Velilla Díaz W. 2008)

3.6.1.1 Composición química.

Su fórmula química es $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}^1$ es soluble en ácidos y se expande al contacto con el agua. En su estructura tiene una capa central que contiene Al y Mg coordinados en octaedros en forma de óxidos e hidróxidos, esta capa a su vez está rodeada por otras dos capas, las capas externas están formadas por óxidos de silicio coordinados tetraédricamente. La montmorillonita entra en la categoría de los minerales filosilicatos. (Velilla Díaz W. 2008).

3.6.1.2 Propiedades físicas.

Aspecto.

Las arcillas presentan coloraciones diversas debido a la presencia en ellas de óxido de hierro, carbonato cálcico y otros componentes. Mantiene un color marrón, amarillo o en ocasiones Gris-blanco. Al momento de ser rayada, refleja un color blanco en la trayectoria de dicha raya. (ASOGUAYABAL. 2014).

Dureza.

En la escala de Mohs, la cual es una relación de diez minerales ordenados por su dureza, de menor a mayor. Se utiliza como referencia de la dureza de una sustancia y se basa en el principio de que una sustancia cualquiera puede rayar a otras más blandas, sin que

suceda lo contrario. La montmorillonita tiene una dureza de 2, y comparado según la Tabla de Mohs, su dureza equivale a la dureza del yeso.

Tabla 13. Durezas equivalentes para algunos minerales.

MINERAL	MOHS	MATERIALES	BRINELL	KNOOP
Talco	1	Plomo		
Yeso	2-2.5	Cadmio, oro, arcilla	30	32
Calcita	3	Aluminio, cobre,...	60	135
Fluorita	4	Hierro, níquel,...	100	163
Apatita	5	Cobalto, aceros al carbono	175	363
Feldespató	6	Titanio, óx. Magnesio,..	300	560
Cuarzo	7	Tantalio, manganeso,...	500	780
Topacio	8	Acero cementado	900	1250
Corindón	9	Cerámica aluminosa	1500	2000
Diamante	10	Carburos de tantalio y boro	2500	8500

Fuente: (STEMM® 2007).

Densidad: Su densidad varía dependiendo a los diferentes estados en los que se encuentre la arcilla, conforme a los datos de la Tabla 14.

Tabla 14. Densidades en diferentes estados de la arcilla (ton/m3).

Arcilla	1-1.9
Arcilla(húmeda)	1.53
Arcilla compactada sólida	1.74
Arcilla en trozos	1.01
Arcilla excavada en agua	1.28
Arcilla gris, granulosa	0.80-1.52
Arcilla húmeda	0.55-0.85
Arcilla mojada (compactada)	1.90
Arcilla molida	0.96-1.60
Arcilla recién excavada	1.75
Arcilla refractaria en polvo	0.40-1.28
Arcilla seca	1.55
Arcilla seca en terrones sueltos	1
Arcilla y barro, húmedo	2.0-2.1
Arcilla y barro, seco	1.6-1.8
Arcilla y grava secas	1.60

Fuente: (STEMM® 2007).

Porosidad

El grado de porosidad varía según el tipo de arcilla. Esta depende de la consistencia más o menos compacta que adopta el cuerpo cerámico después de cocción. Las arcillas que cuecen a baja temperatura tienen un índice más elevado de absorción puesto que son más porosas. Color: las arcillas presentan coloraciones diversas después de la cocción debido a la presencia en ellas de óxido de hierro, carbonato cálcico y otros componentes. (Velilla Díaz W. 2008).

Plasticidad

Mediante la adición de una cierta cantidad de agua, la arcilla puede adquirir la forma que uno desee. Esto puede ser debido a la finura del grano. (Cuanto más pequeña y aplanada), la atracción química entre las partículas, la materia carbonosa y la cantidad de materia orgánica. Debido a la evaporación del agua contenida en la pasta se produce un encogimiento o merma durante el secado. (Velilla Díaz W. 2008).

Refractaridad

Todas las arcillas son refractarias, es decir resisten los aumentos de temperatura sin sufrir variaciones, aunque cada tipo de arcilla tiene una temperatura de cocción. (Velilla Díaz W. 2008).

3.6.1.3 Usos

- **Arenas de moldeo**

Las arenas de moldeo están compuestas por arena y arcilla, que proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla, facilitando su moldeo y dándole resistencia suficiente para

conservar la forma adquirida después de retirar el molde y mientras se vierte el material fundido. (Velilla Díaz W. 2008).

- **Lodos de perforación**

A pesar de los numerosos cambios que han tenido las formulaciones de los lodos de perforación, la arcilla sigue utilizándose en gran medida.

Los lodos de perforación son los fluidos bombeados que circulan a través del pozo mientras este es perforado. Su composición se ajusta a medida que cambian las exigencias, de acuerdo con la profundidad de la perforación y los otros materiales encontrados. (ASOGUAYABAL. 2014). (Velilla Díaz W. 2008).

Las funciones que debe cumplir el lodo de perforación son:

- Control de presiones de formación y estabilización de las paredes
 - Enfriamiento de la herramienta de perforación
 - Sellamiento o formación de un recubrimiento delgado e impermeable contra la pared del pozo que no dejar filtrar agua en la formación geológica.
 - Permitir la adición de agentes densificantes
 - Remoción de escombros del fondo del pozo y transporte de los mismos a la superficie.
 - Soporte de parte del peso del Taladro.
- **Peletización**

La arcilla ha venido desde hace más de cincuenta años como agente aglutinante en la producción de pelets del material previamente pulverizado durante las tareas de separación y concentración. Aunque no existen especificaciones estandarizadas para este uso, se emplean bentonitas sódicas, naturales o activadas, puesto que son las únicas

que forman buenos pelets con las resistencias en verde y en seco requeridas, así como una resistencia mecánica elevada tras la calcinación. (ASOGUAYABAL. 2014). (Velilla Díaz W. 2008).

- **Absorbentes**

La elevada superficie específica de la arcilla, le confiere una gran capacidad de absorción. Debido a esto se emplea en decoloración y clarificación de aceites, vinos, sidras, cervezas, etc. Tienen gran importancia en los procesos industriales de purificación de aguas que contengan diferentes tipos de aceites industriales y Contaminantes orgánicos. Se utiliza además como soporte de productos químicos, como por ejemplo, herbicidas, pesticidas e insecticidas, posibilitando una distribución homogénea del producto tóxico. (ASOGUAYABAL. 2014).

- **Material de Sellado**

Las arcillas se pueden utilizar como material de sellado en depósitos de residuos tanto tóxicos y peligrosos, como radiactivos de baja, media y alta actividad. Se utilizan en mezclas de suelos con el fin de disminuir su permeabilidad. De esta forma se impide el escape de Gases o Lixiviados generados en el depósito. La geomembrana es impermeable, mientras que el geotextil es permeable, de modo que permite a la arcilla hinchar, produciendo la barrera de sellado compactada. (ASOGUAYABAL. 2014).

- **Alimentación animal**

La arcilla tiene aplicaciones en la preparación de alimentos concentrados para animales, como adsorbente de toxinas, como aglutinante en los procesos de peletización o

formación de gránulos y como aditivo nutricional. Su aplicación como ligante en la fabricación de alimentos pelletizados para animales se emplea ampliamente en la alimentación de Pollos, Cerdos, Pavos, Cabras, Corderos, y Ganado vacuno. Actúa como ligante y sirve de soporte de Vitaminas, sales minerales, Antibióticos y de otros Aditivos. La arcilla tiene una doble misión: actúa como promotor del crecimiento y como atrapador de toxinas. (Velilla Díaz W. 2008).

- **Catálisis**

Son muchas las aplicaciones de las arcillas como catalizadores en diferentes procesos químicos. Así, son utilizadas en reacciones de desulfuración de gasolina, isomerización de terpenos, polimerización de olefinas, cracking de petróleo, etc. Las propiedades catalíticas de las arcillas son resultado directo de su elevada superficie específica y localización de centros ácidos (activación ácida). Por esta razón la búsqueda de la maximización de la superficie específica es una línea habitual de investigación y aplicación de arcillas. (Velilla Díaz W. 2008).

- **Industria farmacéutica**

Desde hace tiempo las arcillas se vienen usando como excipiente por la industria farmacéutica debido a que no son tóxicas ni irritantes. Gracias a que no pueden ser absorbidas por el cuerpo humano se utilizan para la elaboración de preparaciones tanto de uso tópico como oral. Se utiliza como adsorbente, estabilizante, espesante, agente suspensor y como modificador de la viscosidad. Su principal uso es la preparación de suspensiones tópicas, geles y soluciones. (Velilla Díaz W. 2008).

Aplicación en Ingeniería Civil

Las arcillas se utilizan para cementar fisuras y grietas de rocas, absorbiendo la humedad para impedir que esta produzca derrumbamiento de túneles o excavaciones, para impermeabilizar trincheras, estabilización de charcas, etc. Sus principales usos son:

- Aumenta la capacidad del cemento de ser trabajado y su plasticidad.
- Ayuda a la estabilización y soporte en la construcción de túneles.
- Como lubricante y rellenando grietas en tuberías
- Como soporte de excavaciones.
- Creación de membranas impermeables en torno a barreras en el suelo
- En las obras puede ayudar a evitar el desplome de paredes lubricándolas con lechadas de arcilla.
- Proporciona seguridad en el caso de rotura de cables enterrados en tomas de tierra.

3.6.2 Proceso de caracterización

La caracterización es el proceso físico-químico, en la cual se busca identificar el tamaño de partícula, en este caso el tamaño de partícula específico de las arcillas, analizar la superficie de esas arcillas para reconocer la topografía de cada una de las partículas, luego hacer un análisis químico de qué elementos de la Tabla periódica está constituido el material, y con base en eso realizar pruebas catalíticas para transformar una sustancia en otra en términos de química orgánica fundamentalmente. Todo el proceso ha sido descrito por el profesor Mario Barrera Vargas, Químico coordinador del laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba.

Para eso se requiere que las partículas tengan un tamaño inferior a las 250 micras (μm), de ésta manera se puede analizar la arcilla en sus diferentes tamaños, hasta llegar al tamaño aproximado de 2 μm . Por ello es necesario pulverizar el material con el que se

va a trabajar, luego del proceso de pulverización, se tamiza el material para separar las partículas de mayor tamaños, puesto que estas ya no se consideran arcillas, pueden ser areniscas u otro tipo de material, de esta manera se va a permitir identificar la arcilla o el material arcilloso.

- **Al inicio**

Los materiales que se trabajan en la caracterización, son muestras de suelos que llegan de diferentes regiones de Córdoba y Sucre. Éstos materiales traen una cantidad de sustancias que no son utilizables en los propósitos de dicho proceso, y en el laboratorio se aíslan esas sustancias, se purifican y sólo se quedan los materiales como las arcillas, también se encuentra cuarzo, areniscas, entre otros; las cuales después de triturar se separan.

- **La separación**

Como ese material es fácil de compactar, después de que se sacan esas sustancias, se forman terrones grandes, que hay que volverlos a subdividir hasta que se conviertan en estructuras más pequeñas, esas estructuras se llevan a polvo, siendo así que ese polvillo que se obtiene mantiene varios tamaños y por lo tanto se tiene que llegar a un tamaño de 2 μm , que es el tamaño en el cual están clasificadas las arcillas. Como no existe un tamiz con un tamaño de apertura de 2 μm , para el análisis de la muestra se necesita una cantidad aproximada de 5 a 10 gramos de 250 micras (tamiz #60) y otra cantidad aproximada de 2 a 5 gramos de 75 micras (tamiz #200) para el desarrollo de la caracterización.

- **La caracterización**

Entraría la caracterización fisicoquímica, la caracterización química y el paso por el espectroscopio. Específicamente se realiza difracción de rayos X, y por medio del cual se conoce el tamaño de partícula, la cristalinidad, clasificación de fases, ya que el material no se va a encontrar totalmente puro. De la mezcla de arcilla la que se encuentre en mayor cantidad es la que va a servir de parámetro para la caracterización. La topología de la partícula se hace con microscopía electrónica de barrido y aplicando la ayuda del software se puede saber cómo son las rugosidades que tienen esas partículas en la superficie y saber fenómenos disfuncionales para trabajar en la transformación de compuestos que son de interés en la industria.

Según otros trabajos realizados.

En la actualidad las investigaciones están marcando la diferencia en el desarrollo e innovación de la técnica de molienda que se venía practicando de manera empírica. Promoviendo la investigación en el caso particular de la caracterización de arcillas, en el proceso de la molienda de arcilla, no abundan muchas bases profundas, puesto que los estudios que se han realizado en el área de la trituración y molienda de minerales, convergen más que todo en minerales como la grava, cuarzo, barita, entre otros.

El proceso de la molienda de arcilla ha venido manejando parametrizaciones que empezaron de manera empírica pero que con la experiencia se han podido desarrollar y mejorar, con resultados en óptimos en la actualidad. (SBM® 2014).

Alcántara Valladares J.R., (2008). Planteó el diseño práctico de un molino de bolas, como opción de tesis profesional, utilizando expresiones, relaciones y consideraciones analizadas y evaluadas en pruebas, de tal forma que sus resultados sean confiables en modelos industriales y en casos particulares con molinos a escalas.

Las consideraciones expuestas por los casos anteriores están basados en la práctica, en algunos casos, prácticas que están siendo aplicadas en la industria (SBM® 2014). Esto ha permitido realizar modificaciones que desarrollan la eficiencia de los diseños, tales como el blindaje interno del tambor, la geometría, tamaño y material de los elementos molidores, como también el avance en teorías, expresiones y nuevas consideraciones.

Grueso y Herrera, 2005, realizó el proceso detallado del diseño y construcción de un molino de bolas compuesto por cuatro tambores, dispuestos en forma vertical que combina el movimiento planetario y rotatorio conferido a los recipientes que contienen

el material, para optar al título de ingeniero mecánico. Hacen uso de expresiones matemáticas, consideraciones de análisis estructural basado en simulaciones dinámicas para el diseño de todos los mecanismos y partes que componen específicamente el molino. (*Grueso Jorge M., Herrera Diego F., 2005*).

Ángulo G. 2005. Elaboró el diseño de un molino pendular para la trituración de arcillas, trazando aspectos relevantes en cuanto a la moliendabilidad de la arcilla, relaciones y parámetros concernientes en la operación y manipulación de la arcilla seca dispuesta en terrones sueltos. Asimismo, elabora un plan de mantenimiento preventivo de la máquina para asegurar el correcto funcionamiento de la misma durante la vida prevista teniendo en cuenta las propiedades más sobresalientes de la arcilla. (*Ángulo García F. X., 2005*).

De Carvalho y Tavares, 2013. Propuso un modelo mecánico del molino de bolas, y su trabajo describe su aplicación en la simulación de los molinos que operan bajo unas condiciones específicas del material en operación. Para las tasas de molienda se han estimado en la realidad utilizando los datos de estas simulaciones, y se utiliza para investigar el efecto de las variables de operación y parámetros de diseño en la molienda. (*De Carvalho y Tavares, 2013*).

De Carvalho y Tavares, 2013. Propuso un modelo mecánico del molino de bolas, y su trabajo describe su aplicación en la simulación de los molinos que operan bajo unas condiciones específicas del material en operación. Para las tasas de molienda se han estimado en la realidad utilizando los datos de estas simulaciones, y se utiliza para investigar el efecto de las variables de operación y parámetros de diseño en la molienda. (*De Carvalho y Tavares, 2013*).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En cualquier diseño es indispensable seguir ciertos pasos de actividades de orden lógico secuencial, encaminados hacia el objetivo planteado, que nos permitan planificar y gestionar apropiadamente los recursos involucrados para tener la certeza de la funcionalidad del equipo que se desea construir. Para el desarrollo del proyecto se utilizó una metodología básica de diseño cuya estructura brinda lineamientos apropiados para alcanzar los objetivos propuestos abordándolos hasta el cumplimiento de dichos objetivos.

4.1 ETAPA I: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS INICIALES

Se estableció el punto de partida del proceso de diseño obteniendo a través de las entrevistas realizadas al coordinador del laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba, el profesor Mario Barrera Vargas las especificaciones de entrada y salida del dispositivo.

Como parámetros de entrada y salida se tuvo el tipo de material a pulverizar en el laboratorio de materiales y catálisis de la Universidad de Córdoba; el cual resultó ser arcilla tipo Montmorillonita dispuesta en terrones sueltos.

También fué relevante conocer la cantidad de lo que es considerado una muestra representativa de ese material y la cantidad necesaria para realizar un (1) ensayo de caracterización en el tamaño de partículas correspondiente. El primero corresponde a una cantidad de 5 kg y fue necesario para tenerlo en cuenta en el cálculo de la masa de entrada del dispositivo, para que ésta no estuviera por encima de dicho valor, puesto que se estaría diseñando un equipo que quedaría fuera del alcance del laboratorio por falta de material. El segundo estuvo en el orden de 15 a 20 gramos (gr) con tamaños de partículas de entre 75 y 250 micras (μm) libre de contaminación, convirtiéndose éste en el producto final del dispositivo.

La cantidad de ensayos realizados por periodo académico en el laboratorio es 20, dato que fue obtenido con el fin de establecer las horas aproximadas de trabajo al que será sometido el equipo.

De la literatura obtenida y con los parámetros iniciales aportados por el laboratorio, se analizó y se comparó a escala procedimientos de molienda, con el fin de realizar un bosquejo preliminar del prototipo que mejor se adapta a la necesidad requerida, el cual fue un molino de bolas discontinuo; equipo que maneja altas capacidades de reducción entre los 20:1 y 200:1, baja complejidad de operación, bajo costo de fabricación y bajo consumo energético. Consta de un motor eléctrico que transmite la potencia necesaria

para hacer girar el elemento móvil, compuesto por un cilindro con tapas en sus extremos, llevando éste en su interior los elementos moledores con geometría esférica.

4.2 ETAPA II: DISEÑO

Potencia de diseño requerida por el molino.

Teniendo una idea clara del molino a diseñar, se dio paso en primera instancia al diseño del motor eléctrico del dispositivo usando la ley de Bond que propuso la expresión:

$$(EC. 1) \quad P_{\text{Trituración}} = (m)(0,3162)(W_i)\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right)$$

Donde P está expresada como los kWh por tonelada corta (907 kg) del material a pulverizar.

Fue necesario conocer el tamaño del material de alimentación (F). El cual está en un orden máximo aproximado de 13 mm, dato experimental que se tomó de los ensayos realizados por (Alcántara Valladares J.R., 2008) y (Martínez P. 2011).

Luego se necesitó establecer el tamaño mínimo del material pulverizado a tamizar, dato obtenido por el laboratorio, donde el menor tamaño requerido es de 75 micras (μm), que en las unidades requeridas por la expresión es equivalente a 0.075 mm.

Fue necesario conocer W_i , el cual se tomó de la (Tabla 2), para una molienda por vía seca.

Por último como factor determinante en el cálculo de la potencia es la cantidad de material de alimentación (m) en el proceso. Cantidad que se toma de forma teórica, guiado por la experiencia de molinos similares. (Alcántara Valladares J.R., 2008) y (Martínez P. 2011).

Dimensión del molino

Como segundo paso se abordó las dimensiones del molino, entendiéndose éstas como las dimensiones del tambor de molienda, las cuales se determinaron en función a la potencia antes calculada.

En este orden de ideas, se tomó como referencia la expresión DAWN, expresión que relaciona la potencia de diseño requerida, con las dimensiones del molino. El cálculo se basó en determinar el tamaño del molino y el volumen de carga necesario para usar la potencia requerida de modo de obtener la producción propuesta

$$(EC. 5) \quad KW = 0,284 DAWN;$$

Donde KW equivale a la potencia de diseño requerida por el molino. Esta expresión involucra el diámetro del tambor (D) dentro del emplacado en metros, parámetro que fue el objetivo en primera instancia de dicha expresión. De esta manera las demás variables que incluyeron el diámetro interno del tambor, se resolvieron de tal forma que quedarán en función exclusiva de este, con la intención de calcular su valor.

Para este propósito se hizo necesario conocer La masa de carga, la cual está dispuesta por la expresión:

$$\text{Masa de Carga} = W = (\text{volumen del molino}) (\text{fracción de carga } J) (\text{densidad de la bola})$$

(EC. 3)

Se necesitó conocer el volumen del molino el cual está definido en términos de la relación de L/D que para laboratorio son óptimas las relaciones de 1.6:1 – 1.8:1, del que se usó 1.8. (Alcántara Valladares J.R., 2008).

De esta forma se determinó el área de un círculo en términos de D, y se multiplicó por L, despejada de la relación L/D=1.8

Para la fracción de carga del volumen del molino (J), que es volumen de carga con respecto al volumen total del tambor. Éste está como valor mínimo 28% y máximo 50%. Se optó por tomar el valor mínimo puesto que el diseño es a escala de laboratorio.

Otro factor necesario para resolver la masa de la carga, es la densidad de las bolas. Que de acuerdo a la densidad de apilamiento, para bolas de acero fue de 4.47 ton/m³. (DUDA W. H. 1977. p74) (Alcántara Valladares J.R., 2008).

Como se había explicado anteriormente este valor quedó indicado en términos de D, con el fin de ser usado en la expresión (EC. 5)

El siguiente parámetro a resolver fue la velocidad del molino (N), la cual se obtuvo como el 72% de la velocidad crítica de rotación (N_c). Los rangos óptimos están entre 70 y 80% de N_c, (DUDA W. H. 1977. p72)(Alcántara Valladares J.R., 2008). Así la expresión que se usó fue (EC. 2^a). Una vez resueltas las expresiones anteriores, se reemplazó en la expresión (EC. 5), despejando el valor D.

Una vez hallado el diámetro interno del tambor; se usó este valor para determinar la masa de carga y la velocidad de rotación del tambor. Del valor que se obtuvo de la masa de carga se sustrajo el 49%, por concepto de espacio vacío.

Longitud

Del cálculo del tambor se tiene hasta el momento el diámetro, conocido el valor D, se obtuvo la longitud, usando la relación de L/D.

Con las dimensiones claras del tambor, se procedió a seleccionar el material usado para su construcción, teniendo en cuenta las especificaciones dadas por el laboratorio en la

Tabla 17, que reflejan las ventajas y desventajas de ciertos materiales con respecto a la arcilla.

Carga de Arcilla (C) y de Bolas (S)

Hasta este punto, se hubo calculado la cantidad de carga dentro del tambor, pero aún no se tiene una proporción de ambos. Los molinos de bolas industriales manejan relaciones de material triturado (C) y triturante (S) mínimo de 7 – 8 y máximo de 10; por efecto de ser un dispositivo a escala, se optó por tomar un valor inferior, igual a la relación de diámetro y longitud. $S/C = 1.8$ (Alcántara Valladares J.R., 2008) (DUDA W. H. 1977)

De esta forma se determinó la cantidad correspondiente de C y S.

Diámetro de Bolas

De la literatura examinada (Alcántara Valladares J.R., 2008) (Ángulo García F. X., 2005), se obtuvo la siguiente expresión, con la cual pasó a determinar la dimensión de bola nominal.

$$(EC. 4) \quad D_b = 0.1 \sqrt{\frac{X_p \cdot E_t}{K \cdot n_r}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\sqrt{D_t}}}$$

Con los siguientes parámetros como variables necesarias:

K Es una constante de molibilidad, que para bolas es 143 (S. métrico) y 200 (S. inglés). Como a lo largo de todo el proyecto se trabajó con el sistema internacional (S.I.), se tomó 143.

De la Tabla 2, se obtuvo W_i para molienda por vía seca., que para esta expresión equivale a E_t ,

De la Tabla 12 se obtuvo ρ_s

X_p es el tamaño de la alimentación de la arcilla, se hizo en terrones sueltos con tamaños aproximados de 1,3 cm aproximadamente, puesto que estos tamaños fueron los apropiados para molinos a escala de laboratorios, después de una serie de ensayos realizados por (Alcántara Valladares J.R., 2008)

n_r , es el porcentaje de la velocidad crítica N_c , que para este caso se tomó un 0.72.

Una vez se resolvió la anterior expresión con los parámetros anteriormente expuestos, se determinó el diámetro de bolas pequeñas.

Teniendo en cuenta que el equipo fué diseñado para dar un tamaño de partícula bastante pequeño, es recomendable usar tres tamaños de bolas, un tamaño estándar arrojado por la expresión (EC. 1.2.1) el cual dará finura y otros dos por encima de ese tamaño estándar encargados de fragmentar los terrones de arcilla seca.

Es vital que las bolas grandes sobrepasen dicho tamaño, ya que estas se encargaran de fragmentar los terrones grandes (Alcántara Valladares J.R., 2008). Un intervalo adecuado de diámetros es, 20 mm - 25.4 mm de diámetro, en una proporción de 25%; 15 mm – 18 mm de diámetro, en una proporción de 40% y para las bolas pequeñas un tamaño adecuado sería \leq 8 mm, en una proporción de 35%.

De acuerdo a los procesos de molienda en los cuales implementan molinos de bola, en la actualidad el material más usado y recomendado por (Alcántara Valladares J.R., 2008) y (DUDA W. H. 1977) para las bolas es el acero al cromo, debido a que tienen una superficie con calidad excepcional, alta dureza y alta capacidad de soporte de carga como resultado de un endurecimiento a fondo. Los balines de acero al cromo también ofrecen una larga vida útil y una gran resistencia a la deformación. (Alcántara Valladares J.R., 2008) (DUDA W. H. 1977). Por tal motivo se usó acero al cromo como

material para las bolas, teniendo en cuenta en la Tabla 21, que es un material adecuado para trabajar con la arcilla.

Diseño de ejes y sus componentes

Una vez obtenido el dimensionamiento del molino, se procede a la elaboración de bosquejos de diseño mediante el uso del software Solidworks® SP3 v 2015, para determinar las longitudes requeridas de cada uno de los cambios de sección del eje teniendo en cuenta los componentes del mismo.

Luego de definir el dimensionamiento longitudinal, los cálculos de diseño iniciaron con la elaboración de un diagrama de cuerpo libre del eje conductor en el cual se establecieron los ejes coordenados con los que se trabajó, las reacciones en los rodamientos y fuerzas que ejercen la transmisión de potencia y el tambor sobre el eje.

Para hallar la carga que ejerce el tambor sobre el eje se implementó un modelo en el cual el peso de la arcilla, de las bolas y el tambor se concentran en el centro. Mientras que para calcular las fuerzas producidas por la transmisión de potencia, fue necesario hacer la selección y el cálculo preliminar de los componentes y el uso de la expresión (EC. 56).

$$W_t = \frac{60000H}{\pi dn}$$

Con los valores de las componentes de las fuerzas sobre los ejes, se determinaron mediante diagramas de distribución de fuerzas cortantes y momentos en los planos ortogonales (X-Y) y (X-Z); Se construyó además una Tabla para cada uno de los diagramas para identificar claramente las equivalencias de los valores en dichos

diagramas y la nomenclatura establecida en el diagrama de cuerpo libre correspondiente.

Con base a un análisis estático realizado, se determinaron los puntos críticos del eje y se combinaron los planos ortogonales como vectores para obtener los momentos totales en estos puntos.

Puesto que se quiere asegurar de manera conservadora que el eje no superará el esfuerzo de fluencia y que además se busca que no se presenten deflexiones significativas que puedan afectar el desempeño de la transmisión de potencia, los diámetros mínimos de cada uno de los puntos críticos de eje, se calcularon con un factor de seguridad de 2, utilizando el criterio de Soderberg de acuerdo con la EC. 22.

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

Para ello, se introdujeron las fórmula en una hoja de calculo del programa Microsoft Excel® 2013 para realizar el cálculo del diámetro mínimo en cada punto crítico del eje.

Selección de rodamientos

Luego de obtener una primera iteración de los diámetros para la fatiga y de las estimaciones de las cargas a las que está sometido eje, se realizaron los calculos para la selección de los rodamientos estimando la carga de catálogo (C_{10}) teniendo en cuenta el

método estocástico que considera la confiabilidad de combinada, utilizando la ecuación (EC. 39).

$$C_{10} = a_f F_D \left[\frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0) \left(\ln \frac{1}{R_D}\right)^{\frac{1}{b}}} \right]^{\frac{1}{a}}$$

Una vez obtenido el valor de C_{10} se realiza la selección teniendo en cuenta las dimensiones de rodamientos de alta rotación y bajo costo en aplicaciones de condiciones de operación similares en el sector de las autopartes.

Sistema de transmisión

El diseño del sistema de transmisión culmina determinando las dimensiones del collarín de la rueda y el piñón que obedecen a la selección del diámetro de la sección del eje sobre el cual va montada la rueda y la longitud y diámetro comercial del prisionero seleccionado.

Verificación del factor de seguridad

Con base en la selección de los rodamientos y del sistema de transmisión de potencia, se procede a dimensionar los diámetros de todas las secciones definidas al inicio y se verifica el factor de seguridad que brinda, teniendo en cuenta los cambios que se producen en la segunda iteración mediante la (EC. 21).

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

Accesorios que complementan el equipo

Teniendo en cuenta que en algunos casos la función que ejercerá un elemento de un sistema, significa un factor importante para determinar su geometría y dimensiones.

De este modo, como criterios de selección se consideraron características que relacionan de manera directa la función, las propiedades, las dimensiones, el material y la manufactura de dichos elementos.

Planos constructivos del prototipo

En este punto del proyecto se finalizó la etapa de diseño con base a lo calculado e investigado, elaborando los planos constructivos pertinentes a los elementos que componen el dispositivo, para lo cual se usó el software (Solidworks® SP3 v 2015).

4.3 ETAPA III: PROTOTIPO FÍSICO Y ENSAYOS.

Una vez diseñado y seleccionado todos los elementos que componen la estructura del prototipo molino de bolas, y realizada la documentación necesaria para su fabricación tales como planos constructivos, y CAD, se procedió a establecer para cada elemento las consideraciones detalladas de taller y manufactura para su fabricación.

Prueba de funcionamiento

Terminado el ciclo de construcción del prototipo se dio paso a las pruebas de funcionamiento. A partir de siete (7) ensayos en los que se modificó la carga de arcilla y la carga de bolas, variando sus cantidades con respecto a los valores calculados, registrando los tiempos y los tamaños de producción en la Tabla 15. También fue necesario conocer el tamaño de los tamices a utilizar (Ver ANEXO C), de acuerdo a la norma ASTM E 11-70, información que se encuentra registrada en la Tabla 16.

Tabla 15. Guía de ensayos previos a muestras de Arcillas.

ENSAYOS	ALIMENTACIÓN (gr)				TIEMPO (min)	PRODUCTO (gr)		
	ARCILLA	BOLAS				TAMÍZ		
	$\leq 20\text{ mm}$	$\phi\ 6.35\text{ mm}$	$\Phi\ 17\text{ mm}$	$\phi\ 23\text{ mm}$		#200	#60	TOTAL
E 1	1000	465	820	- -				
E 2	850	465	820	450				
E 3	1100	465	820	450				
E 4	600	465	820	450				
E 5	500	620	820	450				
E 6	1050	620	820	450				
E 7	1050	620	820	450				

Fuente: Autores del proyecto

Esto con el fin de verificar con los resultados obtenidos si el rango óptimo de operación del dispositivo corresponde al rango calculado.

Tabla 16. Denominaciones y Tamaños de Tamices

Denominaciones		Tamaño nominal de
ISO 3310 (1990)	ASTM E11- 70	la abertura
2	10	2.00 mm
1.7	12	1.70 mm
1.4	14	1.40 mm
850	20	850 μm
710	25	710 μm
500	35	500 μm
425	40	425 μm
355	45	355 μm
300	50	300 μm
250	60	250 μm
212	70	212 μm
180	80	180 μm
150	100	150 μm
125	120	125 μm
90	170	90 μm
75	200	75 μm

Fuente: Norma Técnica Colombiana 589 (2000).

Validación

Los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las muestras de arcilla (Tabla 15) sirvieron para evidenciar una apropiada producción de arcilla pulverizada al verificarlos con los datos requeridos por el laboratorio (Tabla 17) y al compararlos con los resultados alcanzados por el laboratorio de materiales y catálisis de la Universidad de Córdoba mediante el procedimiento manual de pulverización (Tabla 18).

Tabla 17. Requerimientos de Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba como parámetros de verificación.

Cantidad y Tamaños de Arcilla pulverizada requerida		Tiempo
≈20 gr		≤ 1 hora
≈5 gr en 75 micras	≈15 gr en 250 micras	

Fuente: Mario Barrera Vargas Coordinador del Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba.

Tabla 18. Resultados alcanzados por el Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba mediante pulverización manual de Arcilla.

Cantidad y Tamaños de Arcilla pulverizada obtenidos		Tiempo
≈10 gr		≈35 horas
180 micras - 250 micras		

Fuente: Mario Barrera Vargas Coordinador del Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba.

De esta manera se garantizó la funcionalidad del equipo y su utilidad en las prácticas de caracterización de arcilla por dicho laboratorio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Potencia de diseño requerida por el molino.

Para un molino de bolas con el llenado correcto y velocidad de rotación óptima, se puede determinar la potencia exigida para la trituración del material mediante la fórmula:

$$P_{\text{Trituración}} = (m)(0,3162)(W_i)\left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}}\right) \quad (\text{EC. 1})$$

Para la cual:

$$F = 13000 \text{ mm}$$

$$P = 0.075 \text{ mm}$$

$$W_i = 7.10 \times 1.3 = 9.23 \text{ KWh (Tabla 2)}$$

$$m = (1.0 \text{ Kg}) / (907 \text{ kg}) = 0.0011 \text{ ton}$$

$$P_{\text{Trituración}} = (0.0011)(0,3162)(9.23)\left(\frac{1}{\sqrt{0.075}} - \frac{1}{\sqrt{13000}}\right)$$

$$P_{\text{Trituración}} = 0.011 \text{ KW}$$

$$P_{\text{Trituración}} = (11 \text{ W}) \text{ (FDS=1.8)}$$

$$P_{\text{Trituración}} \approx \underline{20 \text{ W}}$$

Dimensión del molino

$$KW = 0,284 DAWN; \quad (EC. 5)$$

$$KW = P_{\text{Trituración}} = 0.020W$$

D = en metros (m).

$$A = (1,073 - J) \text{ con } J = 0.28$$

W = masa de carga en Toneladas (Ton).

N = velocidad del molino en rpm.

Masa de carga

$$\text{Masa de Carga} = W = (\text{volumen del molino})(\text{fracción de carga } J)(\text{densidad de la bola})$$

(EC. 3)

Donde:

$$\text{Volumen del molino} = (\text{Área de círculo})(\text{longitud})$$

$$\text{Con } L/D = 1.8$$

$$L = 1.8D$$

$$\text{Así Volumen del molino fue} = \left[\left(\frac{\pi D^2}{4} \right) (1.8D) \right]$$

$$J = 0.28$$

$$\rho_b = (7,85 \text{ ton}/\text{m}^3)(0.57) = 4.47 \text{ ton}/\text{m}^3$$

$$\text{De esta manera tenemos de la (EC. 3): } W = \left[\left(\frac{\pi D^2}{4} \right) (1.8D) \right] [0,28D][4.47 \text{ ton}/\text{m}^3]$$

$$W = 1.773D^3$$

Velocidad del molino (N)

$$N_c = \frac{42,2}{\sqrt{D}} \quad (EC. 2^a)$$

$$N = 0,72N_c = \frac{42,2}{\sqrt{D}}$$

$$N = \frac{30.3}{\sqrt{D}}$$

Ahora reemplazando W y N resueltos en la (EC. 5)

$$0,020 \text{ kw} = 0,284 D (1,073 - 0,28)(1,773D^3) \left(\frac{30,3}{\sqrt{D}}\right)$$

$$0,020 \text{ kw} = 12,64\sqrt{D^7}$$

$$\underline{0,158 \text{ m}} = D$$

$$\underline{0,158 \text{ m}} = D \text{ (diámetro interno)}$$

Masa de carga

$$W = 1,773D^3$$

$$W = 1,773(0,158 \text{ m})^3$$

$$W = 6 \text{ Kg}$$

$$W = (6 \text{ Kg})(0,51)$$

$$\underline{W = 3 \text{ Kg}}$$

Velocidad del Molino

Ya conocido $D = \underline{0,158 \text{ m}}$; usando la EC. 2.1, hallamos la velocidad del molino.

$$N = \frac{30.3}{\sqrt{D}}$$

$$n = \frac{30.3}{\sqrt{0,158 \text{ m}}} = 76.3 \text{ rpm} \text{ Velocidad real óptima}$$

Longitud

Ahora para obtener la longitud, usamos la relación de L/D, reemplazando el valor D.

$$L/D = 1.8$$

$$L = \underline{0,284 \text{ m}}$$

La selección del material a usar para la construcción del tambor, se hizo de acuerdo a los efectos que presentan ciertos materiales con respecto a la arcilla (Tabla 19), información aportada por el coordinador del laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba Mario Barrera Vargas de (De Miguel et al. 2002) reflejando los riesgos de ciertos tipos de materiales para la construcción del tambor.

Tabla 19. Influencia de algunos materiales con respecto a la arcilla

Material	Grado de contaminación	Consideraciones
Cerámicos	Alto, por su contenido de silicio, que contamina a la arcilla.	Costos considerablemente altos. Procedimiento de separación con la arcilla compleja.
Polímeros	Dependiendo el tipo de polímero. Los que contaminan de forma baja, son el Polipropileno, Policarbonato y Policloruro de vinilo.	Resistencia al desgaste y costos. Procedimiento de separación con la arcilla sencillo.
Acero Inoxidable	Bajo.	Alto costo. Procedimiento de separación con la arcilla compleja.
Acero al Carbón.	Medio	Aleaciones resistentes al desgaste y costos. Procedimiento de separación con la arcilla sencilla.

Fuente: De Miguel et al. (2002)

Después de revisar la información anterior, características como bajo costo, funcionalidad, y con propiedades mecánicas apropiadas para la aplicación requerida, se optó por usar policloruro de vinilo.

Los datos obtenidos de este material, fueron tomados de ensayos experimentales realizados en varios perfiles sometidos a diferentes pruebas por (Plasticbages industrial, S.L. 2014) y (Suarez B. 2012) arrojando las propiedades descritas en la Tabla 20.

Tabla 20. Propiedades Físicas del Policloruro de Vinilo

PROPIEDADES	MÉTODO DE ENSAYO	UNIDADES	VALOR
Densidad	DIN53 505	gr/cm ³	1.24
Dureza	DIN53 505	Shore	75
Alargamiento a la rotura	DIN53 455	N/mm ²	1.6
Resistencia al desgarre	DIN53 455	%	340
Absorción de agua	DIN53 495	%	-0.2
Temperatura de trabajo	-	°C	-15, +50
Temperatura de rotura en frío	DIN53 372	°C	-35°C
Protección del sonido	DIN53 453	dB	>35

Fuente: (Suarez B. 2012)

Elevada resistencia química: elevada tolerancia a sustancias altamente alcalinas y ácidas. Posee también una excelente resistencia a la degradación y/o deterioro causado por la acción de microorganismos (hongos y bacterias). (Suarez B. 2012)(Plasticbages Industrial, S.L. 2014).

No contaminante: no migratorio, lo que significa que no reacciona con elementos y compuestos residentes en los suelos. (Suarez B. 2012)

Bajo costo: considerando las propiedades descritas y su elevada longevidad, el costo resulta ínfimo, manteniendo una buena relación calidad/precio. (Suarez B. 2012)

Este material no es un contaminante severo para la arcilla puesto que es de fácil separación, y sumado a esto la arcilla sirve como lubricante alrededor de la superficie del tambor, reduciendo el efecto abrasivo sobre el policloruro de vinilo, dato aportado por el coordinador de laboratorio Mario Barrera Vargas.

Carga de Arcilla (C) y de Bolas (S)

Se procede a calcular la distribución de la arcilla y bolas, dentro de la carga $W = 3 \text{ Kg}$

De la relación

$$S/C = 1.8 \quad (a)$$

$$S + C = 3 \text{ Kg}$$

$$S = 3 \text{ Kg} - C \quad (b)$$

Despejando S de (a) y luego reemplazando (b) tenemos:

$$S = 1.8C$$

$$3\text{Kg} - C = 1.8C$$

$$3\text{Kg} = 2.8C$$

$$\underline{C \approx 1 \text{ Kg}}$$

$$\text{ARCILLA} \quad C \leq 1 \text{ Kg}$$

$$\text{BOLAS} \quad S \leq 2 \text{ Kg}$$

Diámetro de Bolas

$$D_b = 0.1 \sqrt{\frac{X_p \cdot E_t}{K \cdot n_r}} \sqrt{\frac{\rho_s}{\sqrt{D_t}}} \quad (\text{EC. 4):}$$

$$D_t = 0,158 \text{ m}$$

$$K = 143$$

$$\text{De la Tabla 2 } E_t = (7.1)(1.3) = 9.23$$

$$\text{De la Tabla 2 tenemos que } \rho_s = 2.23 \text{ ton/m}^3$$

$$X_p = 0.013 \text{ m}$$

$$n_r = 0.72$$

$$D_b = (0.1) \sqrt{\frac{(0.013) \cdot (9.23)}{(143) \cdot (0.72)}} \sqrt{\frac{2.23}{\sqrt{0,158}}}$$

$$D_b = 0,0081 \text{ m}$$

De esta manera el del diámetro máximo de las bolas pequeñas será de $D_b = \underline{8 \text{ mm}}$.

Con una distribución porcentual inicial recomendada en los estudios realizados por la referencia:

$$\emptyset \text{ aprox. } \leq 8 \text{ mm} \quad \xrightarrow{35\%} \quad \bullet \quad (0.35)(2000 \text{ gr}) = 700 \text{ gr}$$

$$\emptyset \text{ aprox. } \approx 18 \text{ mm} \quad \xrightarrow{40\%} \quad \bullet \quad (0.4)(2000 \text{ gr}) = 800 \text{ gr}$$

$$\emptyset \text{ aprox. } \approx 24.5 \text{ mm} \quad \xrightarrow{25\%} \quad \bullet \quad (0.25)(2000 \text{ gr}) = 500 \text{ gr}$$

De acuerdo a los procesos de molienda en los cuales implementan molinos de bola, el material usado y recomendado por (Alcántara Valladares J.R., 2008) y (DUDA W. H. 1977) es el acero AISI/SAE 52 100, cuyas características están establecidas en la Tabla 21. Esta Información corresponde a las bolas que se utilizaron para el proyecto, que fueron tomados de los rodamientos consignados en el **Catálogo WL 41 520/3 SB de FAG**, el cual implementa el material según el estándar europeo **DIN EN 100Cr6** o **AISI/SAE 52100** según el estándar americano. (ver Anexo E1)

Tabla 21. Propiedades Físicas del AISI/SAE 52 100

MATERIAL	AISI/SAE 52 100 (Acero al cromo)	
	C	0.9- 1.5 %
	Si	0.15- 0.30%
	Mn	0.25- 0.45%
	P	≤ 0.03%
	S	≤ 0.03%
	Mo	≤ 0.9%
	Cr	1.35- 1.6%
	Al	≤0.05%
TRATAMIENTOS	Temple. 800 - 830 °C agua 830 – 870 °C aceite	
	Revenido	150 – 180 °C
PROPIEDADES MECÁNICAS	Alta capacidad de soporte de carga	
	Alta dureza superficial	60 – 66 HRC
	Alta resistencia a la deformación	
	Alta resistencia al desgaste	
	Alta resistencia a la corrosión	

Fuente: (METALSERVICE ® 2016)

Diseño del eje y sus componentes

Las longitudes de cada uno de los cambios de sección del eje teniendo en cuenta los componentes del mismo se muestran en la Figura 22.

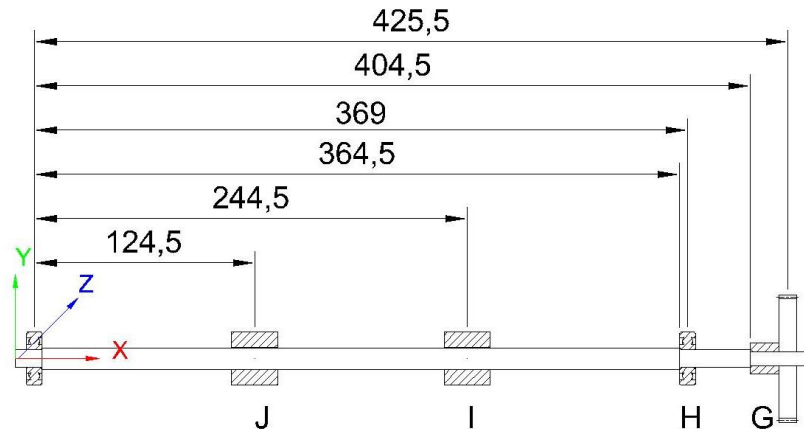


Figura 22. Dimensionamiento longitudinal del eje conductor

Fuente: Autores del proyecto

Las Figuras 23 y 24 muestran los diagramas de cuerpo libre necesarios para el análisis estático del eje, donde:

F_{32}^t, F_{32}^r := Fuerza tangencial y fuerza radial o de empuje sobre la rueda

F'_{Z32}, F'_{Y32} := Componente de la fuerza resultante del sistema de transmisión de potencia sobre el eje conductor

P_y, P_z := Componentes de la fuerza P producida por el peso de los componentes que soporta el eje conductor

$R_{AY}, R_{AZ}, R_{BY}, R_{BZ}$:= Componentes de las fuerzas de reacción de los rodamientos sobre el eje conductor

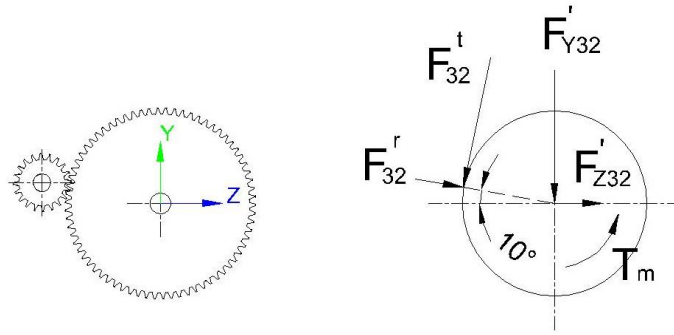


Figura 23. Diagrama de cuerpo libre de la rueda sobre el eje conductor
Fuente: Autores del proyecto

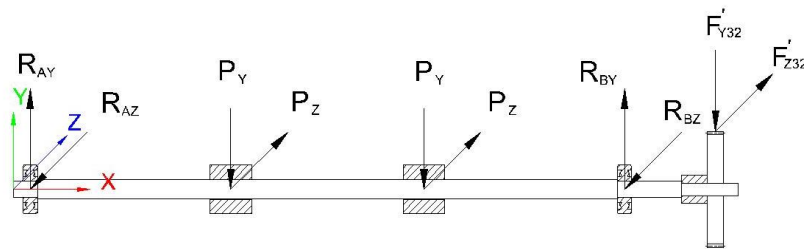


Figura 24. Diagrama de cuerpo libre del eje conductor
Fuente: Autores del proyecto

El peso total de la carga w que soporta el eje, es la suma del peso de las bolas, la arcilla y el tambor como se indica en la siguiente expresión.

$$w = \text{peso de las bolas} + \text{peso de la arcilla} + \text{peso del tambor}$$

Donde

$$\text{Peso de las bolas} = 1.9 \text{ Kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 18.6 \text{ N}$$

$$\text{Peso de la arcilla} = 1.0 \text{ Kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9.8 \text{ N}$$

Para el peso del tambor, trabajando con tubos de PVC, cuya densidad se tomó de la Tabla 20, $\rho = \frac{1240 \text{ Kg}}{\text{m}^3}$, calculando el volumen aproximado teniendo en cuenta la geometría sugerida calculada mediante el software SolidWorks® SP3 v2015 el cual es $V_{\text{tambor}} = 6.8448 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Es necesario tener en cuenta que el diámetro nominal del

tubo es un poco menor al real y el cálculo se hizo con un diámetro interno aproximado de 158 mm y un espesor promedio de 5 mm. (Pavco® 2016).

Debido a la representación del tapón en el CAD el volumen de las tapas es de

$$V_{tapas} = 3.9876 \times 10^{-4} m^3 * 2 = V_{tapas} = 7.9752 \times 10^{-4} m^3$$

Se espera que en la realidad el peso total del tambor sea aproximado a

$$V_t = 1.482 \times 10^{-3} m^3$$

$$peso\ del\ tambor = w_t = V_t * \rho * g = 1.482 \times 10^{-3} m^3 * \frac{1240 Kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} = 18.0 N$$

Así, el peso total sobre los ejes es la suma del peso de la arcilla, las bolas y el tambor:

$$w = 9.8 + 18.6 + 18.0 \approx 46.5 N$$

Ahora bien, como son 4 puntos de apoyo (2 de cada lado) que se consideran fuerzas puntuales P , como lo muestra la Figura 25.

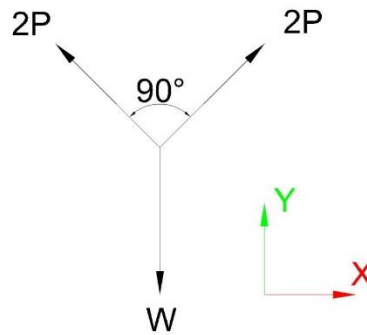


Figura 25 Diagrama de cuerpo libre de la distribución de carga del tambor, asumido como partícula

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con la Figura del diagrama de cuerpo libre de la partícula.

$$\sum F_y = 0: - 46.5 + 4P \cos 45 = 0$$

$$P = \frac{46.5 N}{4 \cos 45^\circ} = 16.4 N$$

$$P = 16.4 N$$

Diseño del sistema de transmisión

Tabla 22. Comparación de distintos sistemas de transmisión.

Transmisión por Correa de Fricción	
ventajas	desventajas
Coste Reducido	Duración limitada
Funcionamiento silencioso	Sensibilidad ambiental
Capacidad de absorción elástica de choques	Sobrecarga de los rodamientos de los árboles
Protección frente a sobrecargas.	Relación de transmisión no exacta al depender de la carga y el deslizamiento existente
Transmisión por Cadena	
Ventajas	desventajas
Coste reducido frente a otros tipos de transmisión	Duración limitada
Relación de transmisión es constante	Requieren de grandes espacios para su instalación
Se pueden accionar varias ruedas con una sola cadena	Deben estar lubricadas y protegidas frente al polvo
Se pueden utilizar en ambientes agresivos sin necesidad de cárter.	Potencia y velocidades máximas transmitidas están limitadas
Transmisión por Engranajes	
Ventajas	desventajas
Relación de transmisión constante e independiente de la carga	Coste elevado
Elevada fiabilidad y larga duración	Generación de ruido durante el funcionamiento
Dimensiones reducidas	Transmisión muy rígida, no absorbe choques ni vibraciones
Elevado rendimiento	

Fuente: Montalvo Moya D., (2013).

Tras analizar las opciones, la razón principal por la que se eligió trabajar con un sistema de transmisión por engranes es debido a la posibilidad de fabricarlo en talleres metalmecánicos de la ciudad de Montería, mientras que las demás opciones resulta difícil adquirirlas en el comercio local para una aplicación tan particular como el diseño

propuesto. Adicionalmente sus características de reducidas dimensiones, fiabilidad y larga duración, satisface los requerimientos de trabajo.

Para mantener bajos los costos de manufactura de hicieron cálculos para la selección y fabricación de engranes cilíndricos de dientes rectos en acero. Se usaron engranes con un ángulo de presión de 20° , Las velocidad de rotación del tambor se estimó con base en la velocidad óptima de rotación $N = 76.3 \text{ rpm}$

Para el diseño de engranes rectos del sistema métrico fueron necesarios los siguientes parámetros, basados en la revisión literaria (Jensen C., Helsel J.D., Short D.R., 2008. p 717 y 722:

- Verificar que el número mínimo de dientes del piñón sea igual o mayor a 13.
- Que el par conjugado tenga un mínimo de 26 dientes.
- Que la velocidad del lineal para engranes de 20° sea menor a 6 m/s.
- Determinar el factor de servicio.
- Determinar a partir del producto de la potencia nominal y el factor de servicio, el módulo requerido para la aplicación.
- Que los módulos estándar para engranes métricos son: 0,8, 1, 1.25, 1,5, 2,25, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, y 16.

Los rodillos de tracción ubicados en el centro del eje, actúan tanto como soporte para la carga de la molienda, como para transmitir la potencia del eje acoplado al motor hacia el tambor. Para este tipo de aplicación se seleccionó el material de neopreno el cual al ser un elastómero comercial brinda propiedades mecánicas como absorción de impacto debido a su flexibilidad, buena resistencia a esfuerzos y un coeficiente de fricción adecuado para el trabajo al cual se somete. (Flowgasket® 2016).

De acuerdo a la función y al material de los rodillos de tracción, se hizo necesario disponer de un elemento flexible, blando, con alto coeficiente de fricción con el neopreno y garantice la tracción de dichos elementos. Por lo cual se decidió seleccionar el látex.

Estas bandas al estar ubicadas sobre el tambor, no deben aumentar el diámetro externo del tambor por lo menos 170.5mm, donde se presenta un cambio considerable en las RPM necesarias. Debido a esto y siendo conservadores las bandas deben tener un espesor máximo de 1 mm, y con un diámetro suficientemente menor a 168 mm para lograr un buen ajuste entre el tambor y la banda, para evitar deslizamientos. En este orden de ideas buscando un material económico y fácil de encontrar en el mercado se seleccionó un guante industrial con las siguientes especificaciones:

Material: Látex

Diámetro: 127 ± 5 mm aproximadamente

Calibre: 50 (0.9 mm)

Elongación mínima al punto de ruptura: 600%

Material del cual se sacaron dos secciones que se aplicaron como las bandas de tracción que entran en contacto con los rodillos de tracción. Para apreciar la información completa sobre este material, ver la ficha técnica del catálogo en el Anexo E3.

Debido a que los rodillos de tracción hacen parte del sistema de transmisión, se establece un diámetro exterior de 30 mm como primera iteración para el diseño. De esta manera, la relación de reducción entre el rodillo y el tambor es:

$$168.5/30 = 5.6$$

La relación 5.6:1, significa que el eje deberá girar a:

$$(76.3)(5.6) = 427 \text{ (rpm)}$$

Con un motor de 1500 rpm, que brinda la potencia requerida de 20 W, la reducción deberá ser de:

$$1500 / 427 = 3.5:1$$

Para asegurar que no haya interferencia y garantizar un adecuado y comodo montaje sobre el eje, se selecciona un piñón de $N_p = 20$ dientes y una rueda N_G , de

$$N_G = (20)(3.5) \cong 70 \text{ dientes}$$

Esta configuración seleccionada nos da un par conjugado de dientes de:

$$70 + 20 = 90 > 26$$

El factor de servicio de acuerdo con la Tabla 23 que clasifica el prototipo como clase I, se sugiere un factor de servicio $F_s = 1$

Tabla 23. Factor y Clase de Servicio de engranes Rectos

CLASE DE SERVICIO	CONDICIONES DE OPERACIÓN	FACTOR DE SERVICIO
CLASE I	8 a 10 horas continuas por turno de trabajo con carga uniforme(sin choque)	1.0
CLASE II	24 horas de trabajo continuo, con carga uniforme, u 8 a 10 horas al día con choque moderado	1.2
CLASE III	24 horas continuas de trabajo con choque de carga moderada	1.3
CLASE IV	Trabajo intermitente, no más de 30 min por hora con carga uniforme (sin choque)	0.7
CLASE V	Operación manual, trabajo limitado, con carga uniforme (sin choque)	0.5

Las cargas con choques fuertes y/o condiciones severas requieren el uso de un factor de servicio más alto. Tales condiciones pueden requerir factores de 1.5 a 2.0 o más grandes que los requeridos para el servicio de Clase I.

Fuente: (Jensen C., Hesel J.D., Short D.R., 2008. p 717)

Con la potencia multiplicada por el factor de servicio de $20 W = 0,02 KW$, se utiliza la Figura 26, se observa que las condiciones de operación están por muy debajo de los módulos señalados, por tanto, se escoge entre los valores comerciales más pequeños que son 0,8 mm y 1 mm, se selecciona el módulo 1 mm debido a que su manufactura es más sencilla y no representa cambio significativo en las dimensiones del diseño en general.

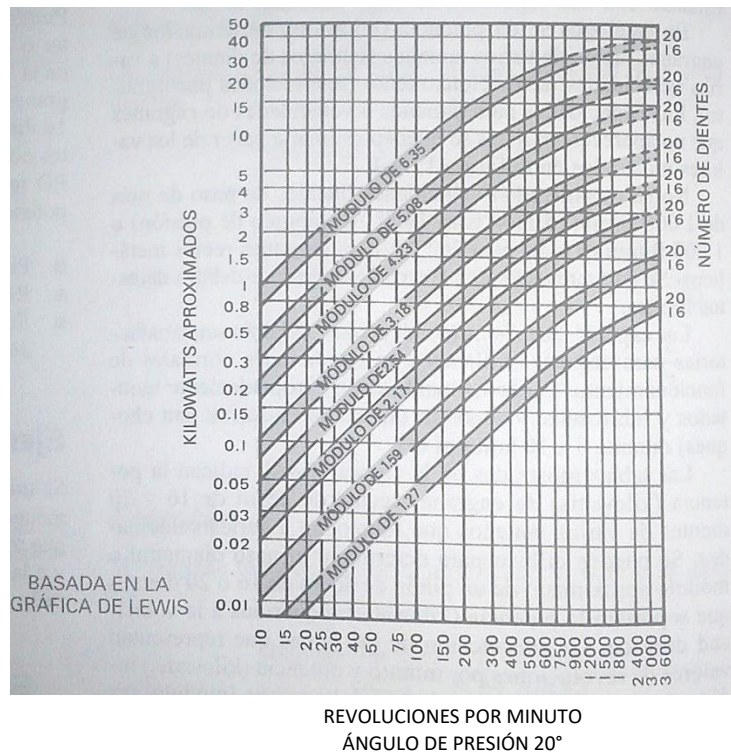


Figura 26. Selección de Módulos de engranes Rectos.
 Fuente: (Jensen C., Helsel J.D., Short D.R., 2008. p 722)

Una vez seleccionado el módulo se procede a verificar la velocidad lineal del piñón cuyo diámetro primitivo es, según la EC. 42.

$$d = (m) (N) = (1)(20) \text{ mm} = 20 \text{ mm} = 0,02 \text{ m}$$

Ahora, la velocidad lineal está definida de la siguiente manera:

$$1 \text{ rpm} = 1 \text{ vuelta/minuto}$$

$$1 \text{ rpm} = 1/60 \text{ vuelta/s}$$

$$1 \text{ rpm} = \pi d/60 \text{ m/s}$$

$$1500 \text{ rpm} = (1500)(\pi)(0,02)/60 \text{ m/s}$$

$$1500 \text{ rpm} = \underline{1.57 \text{ m/s}} < 6 \text{ m/s}$$

El paso diametral de la expresión (EC. 42):

$$p = \pi \cdot m$$

De la cual

$$p = 3.142 \text{ mm}$$

Por lo general el ancho de la cara del diente del engrane es de 3 a 5 veces el paso circular p . Así tomando por restricción de tamaño en el eje de salida de potencia del motor, se tomará un espesor de cara $F=10 \text{ mm}$, lo cual resulta ser 3.2 veces el paso diametral, lo que indica que está en el intervalo usual.

$$F=10.00 \text{ mm}$$

El diámetro de paso del piñón d_p de la expresión (EC. 41)

$$m = \frac{d}{N}, \text{ de donde despejamos } d \text{ se tiene:}$$

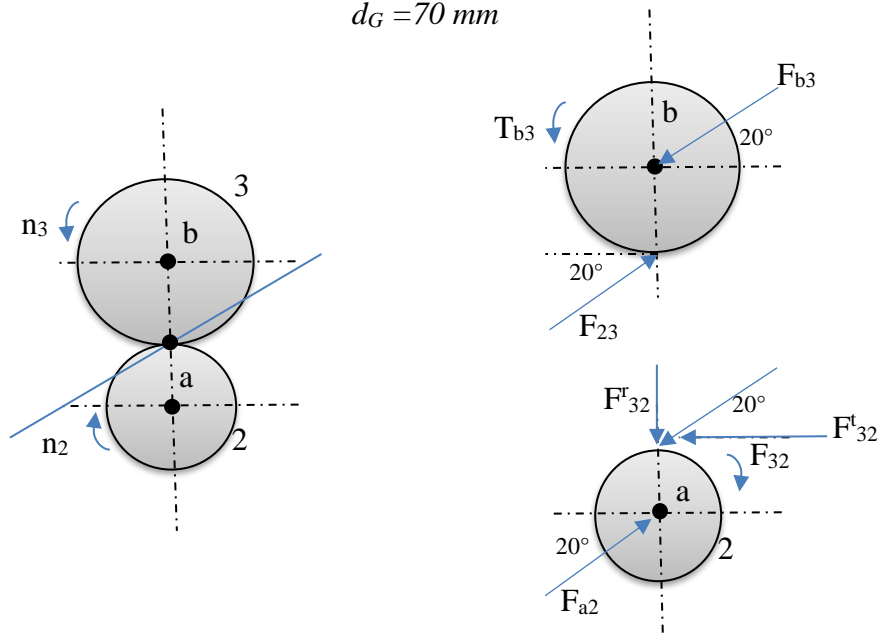
$$d_p = (1 \text{ mm})(20)$$

$$d_p = 20 \text{ mm}$$

El diámetro de paso de la rueda d_G usando la misma la expresión, tenemos:

$$d_G = (1 \text{ mm})(70)$$

$$d_G = 70 \text{ mm}$$



Hallamos la carga transmitida, la cual es una carga tangencial.

De la expresión (EC. 1.51):

$$F_{32}^t = W_t = \frac{60000H}{\pi \cdot d \cdot n}$$

$$W_t = \frac{60000(20 \text{ w})}{\pi \cdot (20) \cdot (1500)} = 12.7 \text{ N}$$

La fuerza radial sobre el eje, con un ángulo de presión de 20° , es:

$$F_{32}^r = F_{32}^t \tan 20^\circ = 12.7 \tan 20^\circ$$

$$F_{32}^r = 4.62 \text{ N}$$

La fuerza total es:

$$F_{32} = \sqrt{F_{32}^t{}^2 + F_{32}^r{}^2} = \sqrt{12.7^2 + 4.62^2}$$

$$F_{32} = 13,51 \text{ N}$$

Para verificar la resistencia a la flexión de los dientes, se utiliza el criterio básico de resistencia a la flexión del método AGMA (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p. 719), el cual establece que para el sistema métrico el esfuerzo es:

$$\sigma = \frac{K_v W^t}{F m Y}$$

El factor dinámico para perfil fresado es:

$$K_v = \frac{6,1 + V}{6,1}$$

La velocidad tangencial de rotación del diámetro primitivo $d=20$ mm y $n= 1500$ rpm es:

$$V = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,02 \cdot 1500}{60}$$

$$V = 1.57 \text{ m/s}$$

Así, el factor dinámico queda:

$$K_v = \frac{6,1 + 1,57}{6,1} = 1,2574$$

El factor de forma de Lewis Y es igual 0,322 de la Tabla 24

Tabla 24. Valores del factor de forma de Lewis Y para un ángulo normal de presión de 20°

Número de dientes	Y	Número de dientes	Y
12	0.245	28	0.353
13	0.261	30	0.359
14	0.277	34	0.371
15	0.290	38	0.384
16	0.296	43	0.397
17	0.303	50	0.409
18	0.309	60	0.422
19	0.314	75	0.435
20	0.322	100	0.447
21	0.328	150	0.460
22	0.331	300	0.472
24	0.337	400	0.480
26	0.346	Cremallera	0.485

Fuente: (Budynas R.G., Nisbett J.K., 2011.p. 718)

El esfuerzo queda entonces de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{1,2574 \cdot 12,7}{10 \cdot 1 \cdot 0,322}$$

$$\sigma = 4,95 \text{ MPa}$$

Se selecciona un acero 1045 maquinado, con una resistencia a la fluencia de $S_y = 310 \text{ MPa}$, con lo cual se consigue un valor más que satisfactorio para el factor de seguridad:

$$n_y = S_y / \sigma = 62.6$$

Para determinar las componentes de la fuerza producto de los engranes, se descomponen la fuerza de reacción del peso del tambor en las proyecciones sobre los ejes coordenados; quedando así:

$$F'_{32} = \begin{Bmatrix} F^r \cos 10^\circ - F^t \sin 10^\circ \\ -F^r \sin 10^\circ - F^t \cos 10^\circ \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 4,62 \cos 10^\circ - 12,70 \sin 10^\circ \\ -4,62 \sin 10^\circ - 12,70 \cos 10^\circ \end{Bmatrix}$$

$$F'_{32} = \begin{Bmatrix} F'_{y32} \\ F'_{z32} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2,34 \\ -13,31 \end{Bmatrix}$$

Las Figuras 27 y 28 muestran las distribuciones de fuerzas cortantes y momentos, seguida de las Tablas de equivalencias 25 y 26 respectivamente.

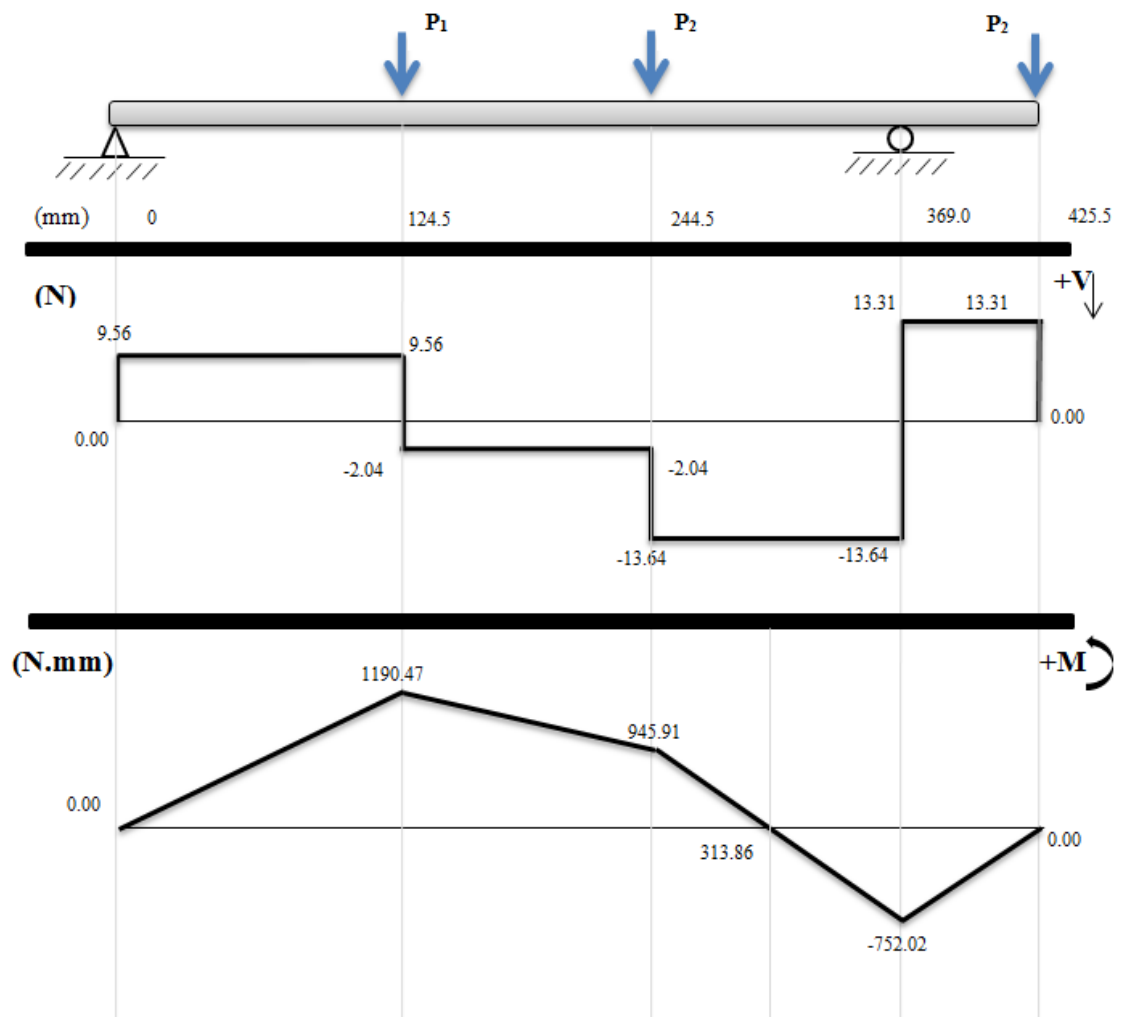


Figura 27. Diagrama de distribución de fuerza cortante y de momentos en el plano (X-Y) sobre en el eje conductor.

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 25. Equivalencia entre los valores de la Figura 27 y el diagrama de cuerpo libre del eje para el análisis del plano (X-Y).

Componente Diagrama de cuerpo libre del eje	Equivalente en diagrama	valor
P_Y	P_1	11.6N
P_Y	P_2	11.6N
F'_{Y32}	P_3	13.31N
R_{AY}	R_A	9.56N
R_{BY}	R_B	26.95N

Fuente: Autores del proyecto

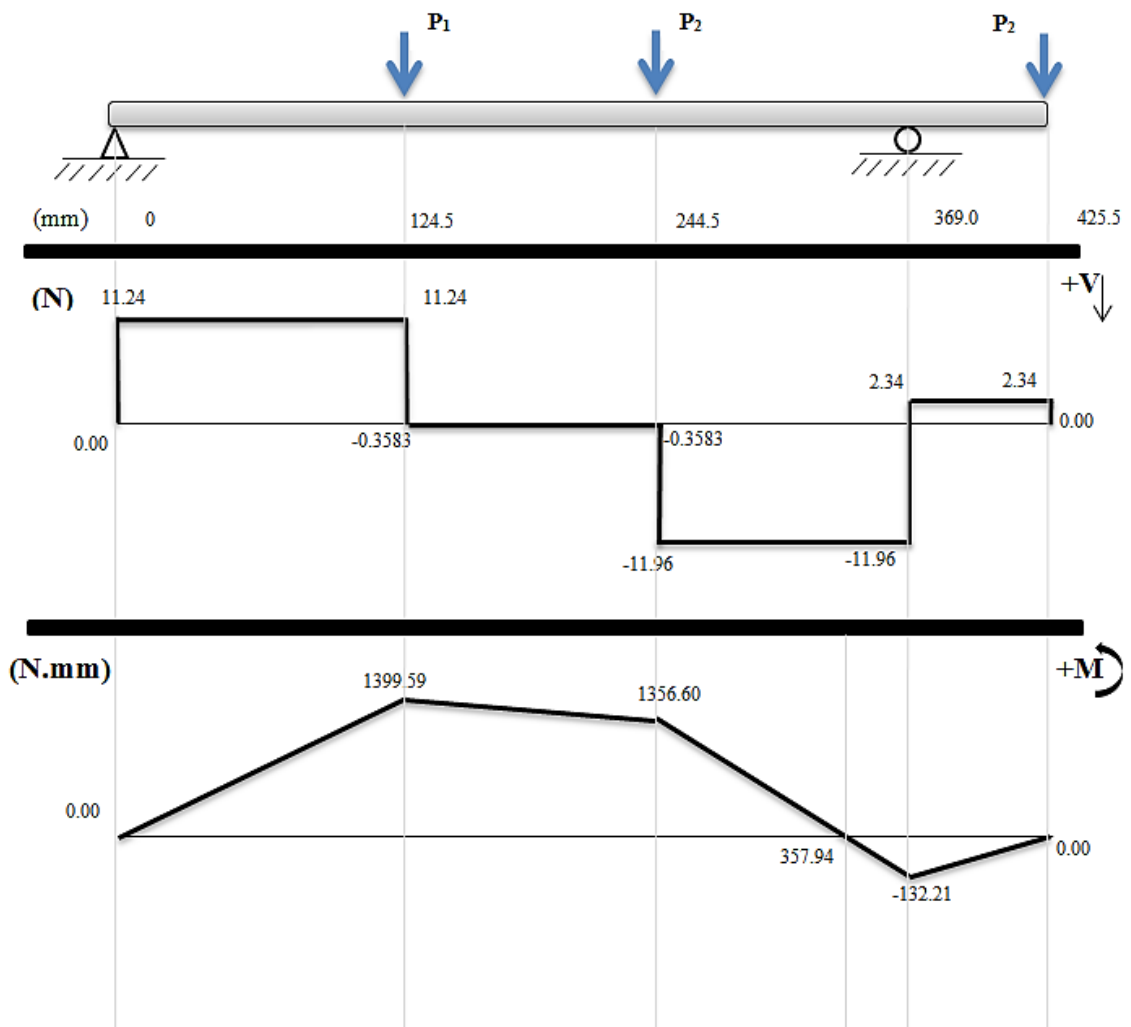


Figura 28. Diagrama de distribución de fuerza cortante y de momentos en el plano (X-Z) sobre en el eje conductor.

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 26. Equivalencia entre los valores de la Figura 28 y el diagrama de cuerpo libre del eje para el análisis del plano (X-Z).

Componente diagrama de cuerpo libre del eje	Equivalente en diagrama	Valor
P_Z	P_1	11.6 N
P_Z	P_2	11.6 N
F'_{z32}	P_3	2.34 N
R_{AZ}	R_A	-11.24 N
R_{BZ}	R_B	-14.30 N

Fuente: Autores del proyecto

Con base a los valores calculados, se determinaron los puntos críticos que señala el digrama de cuerpo libre del eje y se combinaron los planos ortogonales como vectores para obtener los momentos totales, por ejemplo:

en el punto G, el Momento alternante es.

$$M_a = \sqrt{0,173^2 + 0,0049^2} N \cdot m = 0,18 N \cdot m$$

Se considera que el torque del motor se transmite hasta el primer rodillo de tracción del eje, con un valor constante de:

$$T_m = F_{32}^t \cdot \frac{d}{2} N \cdot m = 12,7 \left(\frac{0,07}{2} \right) N \cdot m$$

$$T_m = 0,9 N \cdot m$$

Para la primera iteración se tomó $K_t = 1,5$ y $K_{ts} = 1,7$, además se supuso que $K_t = K_f$ y $K_{ts} = K_{fs}$

la selección del material seleccionado fue acero inoxidable AISI 304 por su resistencia a la corrosión que resulta favorable para la durabilidad, presentación y poco contaminación de las muestras. Los valores de referencia tomados de la Tabla 4b son: $S_{ut} = 568 MPa$ y $S_y = 276 MPa$.

para estimar el esfuerzo de fatiga S_e :

De la ecuación EC. 28.

$$S'_e = 0,5S_{ut} = 284 MPa$$

Se determinan los factores de Marin que modifican el S_e , con las ecuaciones EC. 1.29 y Tabla 7.

$$K_a = 4,51(568)^{-0,265} = 0,840$$

Para K_b (EC. 30) se espera que los diámetros sean cercanos a 10 mm, por lo que para la primera iteración se toma

$$K_b = 1,24 * 10^{-0,107} = 0,969$$

De la ecuación EC. 31 $K_c = 1$.

De la ecuación EC. 32 $K_d = 1$.

De la ecuación EC. 33 $K_e = 1$.

Así, de la ecuación EC. 28.

$$S_e = 0,840 * 0,969 * 1 * 1 * 1 * 1 * 284 \text{ MPa} = 231 \text{ MPa}$$

Con los valores obtenidos y con un factor de seguridad 2 utilizando el criterio de Soderberg, dado que se quiere asegurar de manera conservadora que el eje no superará el esfuerzo de fluencia, se obtienen los diámetros mínimos de cada uno de los puntos críticos de eje, usando la (EC. 22)

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\} \right)^{1/3}$$

Esta fórmula se introdujo en una hoja de calculo del programa Microsoft Excel® 2013 para realizar el cálculo del diámetro mínimo en cada punto crítico del eje. En la siguiente Tabla se muestran los resultados de los cálculos

Tabla 27. Diámetro mínimo del eje en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	Posición en x	Ma (N.m)	Mn (N.m)	Ta (N.m)	Tm (N.m)	Diámetro mm
G	404,5	0,284	0	0	0,9	5,134
H	364,5	0,695	0	0	0,9	5,746
I	244,5	1,654	0	0	0,9	5,881
J	124,5	1,837	0	0	0	5,452

Fuente: Autores del proyecto

Cálculo y selección de cojinetes para las flechas diseñadas.

Para el cálculo de los cojinetes, se decide trabajar con rodamientos rígidos de bolas de una sola hilera. Para el cual se tienen los siguientes parámetros y condiciones de trabajo:

Cargas radiales R_1 y R_2

$$R_1 = \sqrt{A_y^2 + A_z^2} = \sqrt{9.56^2 + 11.24^2} = 14.76 \text{ N}$$

$$R_2 = \sqrt{B_y^2 + B_z^2} = \sqrt{26.95^2 + 14.30^2} = 30.5 \text{ N}$$

$L_D = 14 \text{ Kh}$, de acuerdo a la Tabla 1,8.

Por lo cual se procede a hacer el cálculo con base en la información suministrada por el proveedor NSK® hallando la carga de catálogo para rodamientos rígidos de bolas de una sola hilera, mediante la ecuación:

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^3 = 500 f_h^3$$

Donde L_h es la vida esperada en horas; f_h es el factor de vida de fatiga; C es la carga de catálogo; P es la carga del rodamiento; n es velocidad en rpm.

Como ya se tiene la vida esperada según la aplicación equivalente a $L_D = 14 \text{ Kh}$, se despeja la ecuación para hallar el valor de C.

$$C = 30,5 \left(\frac{14000 \cdot 600 \cdot 427}{10^6} \right)^{1/3} = 467 \text{ N}$$

Con base a la carga, la cual es completamente radial, por lo cual para seleccionar en el catálogo se hace con el valor $C = C_r$. Según el diámetro interior y la disponibilidad en el mercado, las opciones para seleccionar son: 6000, 6200 y 6300.

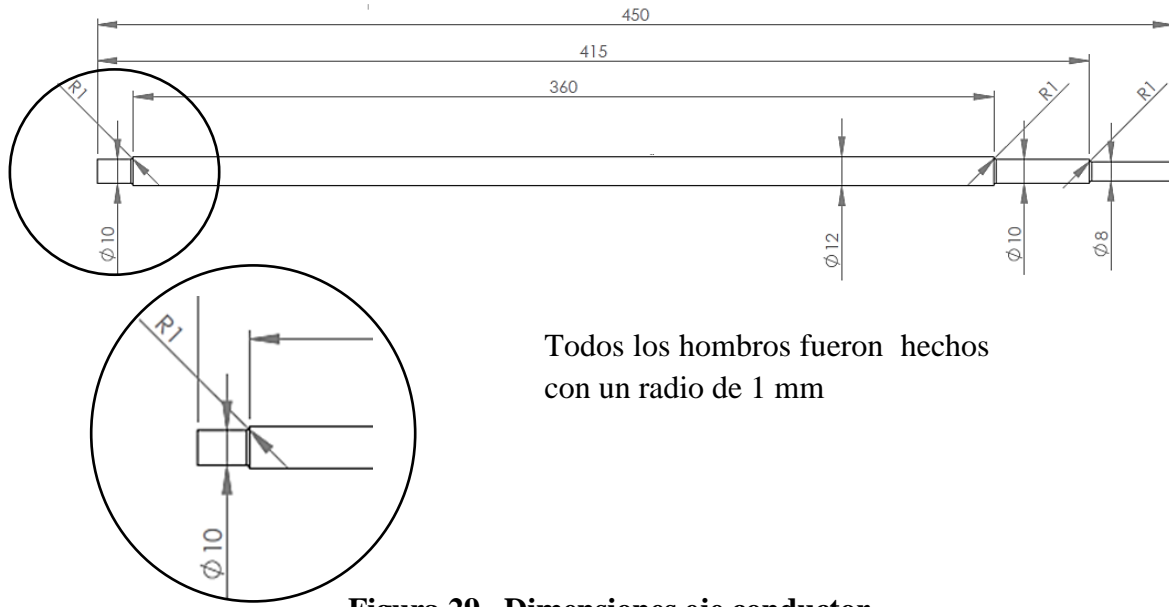
Tabla 28. Dimensiones y clasificaciones de carga para cojinetes de bolas de ranura profunda, de una sola hilera

<i>d</i>	Dimensiones (mm)			Índices de Carga Básica (N)				Factor f_0	Velocidad Límite (rpm)			Números de Rodamiento			
	<i>D</i>	<i>B</i>	<i>r</i> min.	C_r	C_{0r}	C_r	C_{0r}		Grasa		Aceite	Abierto	Blindado	Sellado	
										Abierto Z V	ZZ VV	DU DDU	Abierto Z		
10	19	5	0.3	1 720	840	175	86	14.8	34 000	24 000	40 000	6800	ZZ	VV	DD
	22	6	0.3	2 700	1 270	275	129	14.0	32 000	22 000	38 000	6900	ZZ	VV	DD
	26	8	0.3	4 550	1 970	465	201	12.4	30 000	22 000	36 000	6000	ZZ	VV	DDU
	30	9	0.6	5 100	2 390	520	244	13.2	24 000	18 000	30 000	6200	ZZ	VV	DDU
	35	11	0.6	8 100	3 450	825	350	11.2	22 000	17 000	26 000	6300	ZZ	VV	DDU

Fuente: (NSK®, 2016. p 151)

Se decidió el rodamiento 6200 2RS C3 que son para aplicación de ejes expuestos a intemperie, de las cuales se pueden citar alternadores de automóviles y ejes de las ruedas de algunas motocicletas cuya descripción detallada brindada por el proveedor se encuentran en el anexo E5. Este rodamiento de iguales dimensiones, nos brinda la confianza de seleccionarlo dada la disponibilidad en el mercado y bajo costo, la misma referencia se aplicará a ambos ejes.

Una vez hechas las selecciones correspondientes a los rodamientos y engranes del diseño, se presenta a continuación un esquema con el dimensionamiento de los ejes.



Todos los hombros fueron hechos con un radio de 1 mm

Figura 29. Dimensiones eje conductor

Fuente: Autores del proyecto

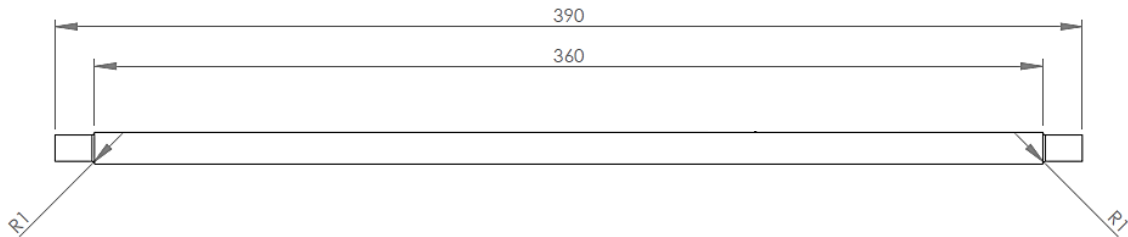


Figura 30. Dimensiones eje conductor

Fuente: Autores del proyecto

Verificación del factor de seguridad

Se procede a verificar el factor de seguridad que brinda, teniendo en cuenta los cambios que se producen en esta segunda iteración, con los valores de entrada mostrados a continuación.

Tabla 29. Diámetro mayor, Diámetro menor y radios de filete en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	D (mm)	d (mm)	r (mm)
G	10	8	1
H	12	10	1
I	12	12	0
J	12	12	0

Fuente: Autores del proyecto

de las Figuras 11 y 12 se estima el valor de los factores de concentración de esfuerzo de flexión y de torsión K_t y K_{ts} respectivamente con el valor del radio de filete y con la relación D/d.

Tabla 30. Valores de los factores de concentración de esfuerzos en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	K_t	K_{ts}
G	1,5	1,37
H	1,58	1,38
I	1	1
J	1	1

Fuente: Autores del proyecto

Se calcula el valor de la *constante de neuber* para torsión y flexión con base en las EC. 37a y EC. 37b

Tabla 31. Valores de $[\sqrt{a}]$ - flexión y $[\sqrt{a}]$ - torsión en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	$\sqrt{a}_{flexión}$	$\sqrt{a}_{torsión}$
G	0,07982	0,06
H	0,07982	0,06
I	0	0
J	0	0

Fuente: Autores del proyecto

Con base en la EC. 36. se calcula la sensibilidad a la muesca q .

Tabla 32. Valores de $q_{flexión}$ y $q_{torsión}$ en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	$q_{flexión}$	$q_{torsión}$
G	0,71313	0,77
H	0,71313	0,77
I	0	0
J	0	0

Fuente: Autores del proyecto

Con la sensibilidad a la muesca y los factores de concentración de esfuerzo (q , K_t y K_{ts}) se hallan los factores de concentración del esfuerzo por fatiga K_f y K_{fs} usando la EC. 35.

Tabla 33. Valores de K_f y K_{fs} en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	K_f	K_{fs}
G	1,356	1,28
H	1,413	1,29
I	1	1
J	1	1

Fuente: Autores del proyecto

Se calcula nuevamente el límite de resistencia a la fatiga, afectado por el factor de tamaño K_b .

Tabla 34. Valores de K_b y S_e en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	K_b	S_e
G	0,993	236803808,4
H	0,969	231216760
I	0,950	226749802,8
J	0,950	226749802,8

Fuente: Autores del proyecto

Con los valores obtenidos se calculo el factor de seguridad n_f aplicando el criterio de soderberg.

Tabla 35. Factor de seguridad n_f según el criterio de Soderberg en los puntos críticos del eje conductor.

Punto	d (mm)	K_f	K_{fs}	S_y (Pa)	S_e (Pa)	M_a (Nm)	T_m (Nm)	n_f
G	8	1,356	1,284	276000000	236803808,4	0,283	0,9	9,570
H	10	1,413	1,291	276000000	231216760	0,695	0,9	12,430
I	12	1	1	276000000	226749802,8	1,653	0,9	16,767
J	12	1	1	276000000	226749802,8	1,837	0	20,935

Fuente: Autores del proyecto

Una vez obtenidos los diámetros, se procede a verificar el dimensionamiento de los rodillos de tracción, los cuales, luego de ensayar con varios diámetros internos, se estableció de \varnothing 10 mm, de manera que se sujete por apriete en la sección del eje donde va situado.

Con base en los calculos del eje conductor se determinó las dimensiones del eje conducido, puesto que las cargas en todos los puntos son menores o iguales que en el eje conductor.

Accesorios que complementan el equipo

Tabla 36. Elementos Mecánicos.

ELEMENTO	FUNCIÓN	MATERIAL	CRITERIO DE SELECCIÓN
Placa de soporte (ver Anexo B2)	<ul style="list-style-type: none"> - Soportar las cargas del sistema, transmitidas a través de los rodamientos. - Separar el tambor de la base. - Conservar la debida distancia entre la rueda y el piñón. 	Acero A36	<ul style="list-style-type: none"> - Con las dimensiones adecuadas para alojar los rodamientos y mantener distancia entre ejes. - De material con bajo costo de compra y fácil manufactura.
Base (ver Anexo B2)	<ul style="list-style-type: none"> - Soportar las cargas de todo el equipo y mantenerlo separado del suelo. - Permitir la sujeción de todos los componentes. 	Acero 304	<ul style="list-style-type: none"> - Debido al entorno, debe ser un material que no despida óxido. - Resistente a las cargas adicionales por manipulación y transporte. - Mantenga buen acabado superficial. - Alta dureza y baja rigidez
Carcasa (ver Anexo B2)	<ul style="list-style-type: none"> - Limitar el acceso a los elementos internos, para prevenir accidentes. - Permitir la sujeción de algunos componentes. 	Acero Galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> - Resistente a la corrosión. - Rigidez estructural. - Fácil y bajo costo de manufactura.
Cubierta (ver Anexo B5)	<ul style="list-style-type: none"> - Permitir la inspección de la cámara de molienda, limitando el acceso a ésta para evitar accidentes. 	Acrílico Transparente	<ul style="list-style-type: none"> - Transparente. - Fácil y bajo costo de manufactura.
Topes Antivibratorio	<ul style="list-style-type: none"> - Amortiguar vibraciones - Evitar deslizamiento del equipo. - Soportar cargas. 	Neopreno	<ul style="list-style-type: none"> - Alta resistencia al desgaste - Buena flexibilidad. - Alta adhesión a superficies cerámicas (baldosas). - Fácil y bajo costo de manufactura.
Rodillos de Tracción (ver Anexo B1)	<ul style="list-style-type: none"> - Transmitir potencia del eje al tambor. 	Neopreno	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia al desgaste. - Alto coeficiente de fricción con el caucho. - Bajo costo de manufactura.
Bandas de Tracción (ver Anexo B1)	<ul style="list-style-type: none"> - Garantizar la tracción de los rodillos al tambor. 	Caucho	<ul style="list-style-type: none"> - Resistencia al desgaste. - Alto coeficiente de fricción con el neopreno. - Bajo costo de manufactura
Tapa (ver Anexo E4)	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionar la apertura y cierre del tambor de forma práctica y segura. 	PVC	<ul style="list-style-type: none"> - Disponibilidad en el mercado. - Fácil maniobrabilidad. - Resistencia a la presión. - Bajo costo.

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 37. Elementos Eléctricos.

ELEMENTO	FUNCIÓN	DESCRIPCION
Puente Rectificador (ver Anexo B3)	Convertir de corriente alterna en corriente continua, proporcionando un sólo sentido a la electricidad.	10 Amperios
Botoneras de tipo pulsador. (ver Anexo B4)	Permitir el cierre del circuito dando (ON) al dispositivo y/o abrirlo dando la parada (OFF) al dispositivo.	Start de color verde y Stop de color rojo, con tamaño sobresaliente de la superficie. Ambos normalmente abierto Norma oficial para la utilización de colores en seguridad y su simbología Decreto ejecutivo 12715 - MEIC
Parada de Emergencia del tipo pulsador con enclavamiento (ver Anexo B4)	Prevenir daños en la máquina o en trabajos en curso, minimizando los riesgos ya existentes debido a una situación de peligro. Según la norma EN ISO 13850.	De Color rojo, con tamaño sobresaliente de la superficie. Normalmente cerrado. Norma oficial para la utilización de colores en seguridad y su simbología Decreto ejecutivo 12715 - MEIC
Relé (ver Anexo B3)	Mantener abiertos o cerrados los contactos de un circuito al momento de energizarse según el propósito.	Relé enchufable del tipo DC, para pequeñas potencias
Fusible (ver Anexo B3)	Evitar que el motor se quemé, cortando el paso de la corriente eléctrica en una eventual sobrecarga.	Del tipo encapsulado, de 1.5 A
Cableado (ver Anexo B3)	Transmitir la corriente eléctrica desde un toma corriente hasta el motor.	1 neutro 1 tierra 1 tensión
Enchufe (ver Anexo B3)	Ser el punto de contacto fijo y seguro con el toma corriente.	Del tipo polarizada

Fuente: Autores del proyecto

Todo el proceso de diseño culminó con el desarrollo de los planos constructivos referentes a los elementos que componen el dispositivo y la elaboración de un modelo a escala (Figura 31) usando el software SolidWork® 2015.

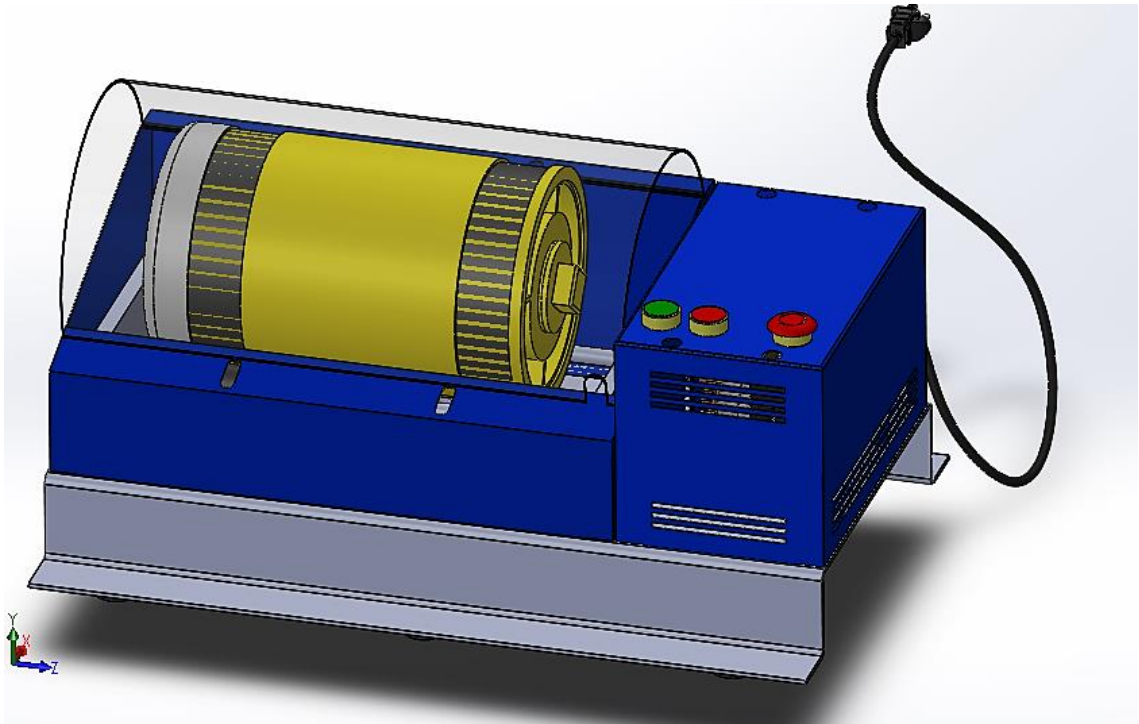


Figura 31. Ensamble final del equipo Molino de Bolas
Fuente: Autores del proyecto.

Para apreciar los planos constructivos del equipo ver Anexo A.

ETAPA III: PROTOTÍPO FÍSICO Y ENSAYOS.

Tabla 38. Procesos de Manufactura Empleada para la Construcción de los Diferentes Componentes del Dispositivo




Descripción	Cant.	Material	Proceso de Manufactura
Soporte eje. (ver Anexo B2)	2.	Acero Estructura SATM A36	Se corta la medida requerida. Se pulen los bordes Se refrenta la cara inferior para garantizar la nivelación adecuada de los ejes Se realiza cilindrado interno a las culas de los rodamientos
Eje conducido	1	Acero AISI 304	Cilindrado Refrentado
Eje conductor	1	Acero AISI 304	Cilindrado Refrentado
Base curva. (ver Anexo B2)	1	Acero inox. AISI 304	Recorte con plasma Doblado de las secciones Pulido de aristas Taladrado de agujeros para sujetadores
Tambor (ver Anexo B1)	1	Policloruro de Vinilo	Recorte de tubo
Rodillos de tracción	4	Neopreno	Cilindrado Taladrado
Angulo soporte	2	Perfil estructural L	Recorte de perfil Taladrado de agujeros para sujetadores
Carcasa tambor/motor (ver Anexo B2)	1/1	Lámina acero galvanizado #18	Recorte Doblado Soldadura TIG Masillado de uniones con soldadura Pintura base anticorrosiva Pintura color
Cubierta (ver Anexo B5)	1	Acrílico transparente	Recorte Doblado Troquelado Taladrado de agujeros para sujetadores
Rueda/Piñón (ver Anexo B1)	1/1	SAE 1045	Cilindrado Tallado en fresa Taladrado del agujero prisionero Taladrado agujero interno Machuelado de rosca prisionero




Fuente: Autores del proyecto

Puesta a punto

Para esta fase del proyecto fue necesario el uso de las instalaciones e instrumentos del laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba.

Así para la realización de los ensayos, se abordó la siguiente secuencia de operación del dispositivo:

<p>Selección en la urna de almacenamiento, la carga de arcilla a manipular, con los tamaños adecuados.</p>	 <p><i>Fuente: Autores del proyecto.</i></p>
<p>Medición de la cantidad de carga de arcilla, usando la balanza digital Adventurer® OHAUS, con capacidad máxima de 210 gr y resolución de 0.0001 gr.</p>	 <p><i>Fuente: Autores del proyecto.</i></p>
<p>Variación en la cantidad de cuerpos molidores de acuerdo a su masa usando la balanza y tamaños correspondientes.</p>	 <p><i>Fuente: Autores del proyecto.</i></p>

<p>Introducir la carga de arcilla y de bolas en el interior del tambor.</p>	 <p><i>Fuente: Autores del proyecto.</i></p>
<p>Cierre de la tapa abatible del tambor</p>	 <p><i>Fuente: Autores del proyecto.</i></p>
<p>Introducir el tambor cargado en la cámara de molienda, cerrar la cubierta y posteriormente dar inicio al proceso, encendiendo (ON) el equipo.</p>	 <p><i>Fuente: Autores del proyecto.</i></p>

Después del tiempo escatimado, se detiene el equipo, sacando el tambor, y se extrae la carga procesada por pequeños lotes sobre los tamices, separando las bolas más grandes para dejar sólo la arcilla y las bolas de menor diámetro con el fin de tamizar el producto sin inconvenientes.



Fuente: Autores del proyecto.

El tamizado se realiza con los tamices dispuestos uno encima del otro, el de mayor apertura (#60) arriba y el de menor apertura (#200) de bajo con su extremo inferior sellado para contener el material particulado.



Fuente: Autores del proyecto.

Se despeja muy bien el tamiz después de terminar cada tamizado, con el objetivo de barrer partículas que no lograron pasar y obstaculicen las aberturas del tamiz.



Fuente: Autores del proyecto.


<p>Terminado el tamizado de toda la muestra triturada, se recolectan los resultados por separado.</p>	 <p><i>Fuente: Autores del proyecto.</i></p>
---	--

Tabla 39. Resultados de ensayos de funcionamiento

ENSAYO	ALIMENTACIÓN (gr)				TIEMPO (min)	PRODUCTO (gr)		
	ARCILLA $\leq 20\text{ mm}$	BOLAS				TAMÍZ		
		Φ 6.35 mm	Φ 17 mm	Φ 23 mm		#200	#60	TOTAL
E1	1000	465	820	- -	20	2.7	19.7	22.4
E2	850	465	820	450	25	4.9	11.2	16.1
E3	1100	465	820	450	25	5.6	15.4	21
E4	600	465	820	450	20	2.3	4.5	6.8
E5	500	620	820	450	45	2.8	4.9	7.7
E6	1050	620	820	450	30	6.9	15.8	22.7
E7	1050	620	820	450	30	5.0	15.1	20.1

De los datos arrojados por la Tabla 39, se pudo observar que la menor obtención de arcilla pulverizada estuvo en los ensayos E4 y E5, seguido luego del ensayo E2, en los cuales se redujo la cantidad de arcilla hasta el 50% del valor calculado, lo cual pudo aumentar el contacto metal-metal por parte de las bolas y así reducir la eficiencia de la molienda hasta un 65% comparado al valor producido con la carga calculada en los intervalos de 1.0kg a 1.1kg de arcilla y 1.9 kg de bolas, en los cuales se logró la mayor producción de arcilla, como se ilustra en la Figura 32.

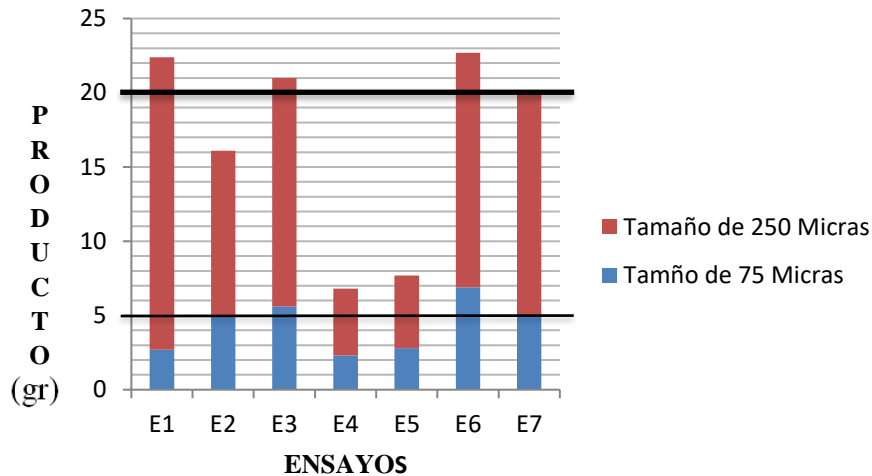


Figura 32. Representación gráfica de ensayos de funcionamientos de funcionamiento.

Fuente: Autores del proyecto

Lo cual evidencia que al disminuir la carga dentro del tambor por debajo del 28%, se pierde mucha eficiencia en el proceso de molienda, y si la baja cantidad de un material se compensa con el aumento del otro también se producirá una baja eficiencia del proceso, evidenciando lo mencionado por Alcántara Valladares J.R., 2008. De esta manera se confirmó que el intervalo para la carga de alimentación calculada resultó ser el más adecuado y funcional.

Validación

De los ensayos realizados con el prototipo “molino de Bolas”, se obtuvo un intervalo de operación, el cuál apuntó a los 20 gramos de arcilla pulverizada requeridos de acuerdo a la Tabla 17 siendo los ensayos E1, E2, E3 y E7 los que ofrecen esa cantidad, pero de los cuales sólo E2, E3 y E7 cumplen todas las especificaciones de dicha Tabla con respecto a los tamaños requeridos, como se muestra en la Tabla 40.

Tabla 40. Validación del equipo

Ensayos	Arcilla pulverizada (gramos)	Tamaños de partículas (µm)								Tiempo
		75	80	95	100	150	180	210	250	Horas
Requerimientos	≈20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	≤ 1
Ensayo Manual	≈10	--	--	--	--	--	✓	✓	✓	35
Ensayo 3	21	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.42
Ensayo 6	22.7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.5
Ensayo 7	20.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	0.5

Fuente: Autores del Proyecto

De esta forma se puede evidenciar de la Tabla 40, que los tiempos de producción de arcilla pulverizada fueron reducidos en un 98.5% con respecto a los tiempos empleados en la producción manual realizada por el laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba, además de ello se duplicó la cantidad de material pulverizado y se aumentó la finura del material pulverizado reduciendo hasta un 59% el tamaño de partícula con respecto al material producido por el método manual, ofreciendo de esta manera un rango un análisis de partícula más amplio.

Por otro lado después del ensayo E6, se pudo evidenciar un notable desgaste en las bandas de tracción ubicadas en el tambor como se puede apreciar en la figura 33, situación por la cual se presume que pudo haber existido una leve pérdida de eficiencia del proceso debido a deslizamientos entre los rodillos y las bandas de tracción, circunstancia que pudo haber influido en los datos de los ensayos posteriores a éste.

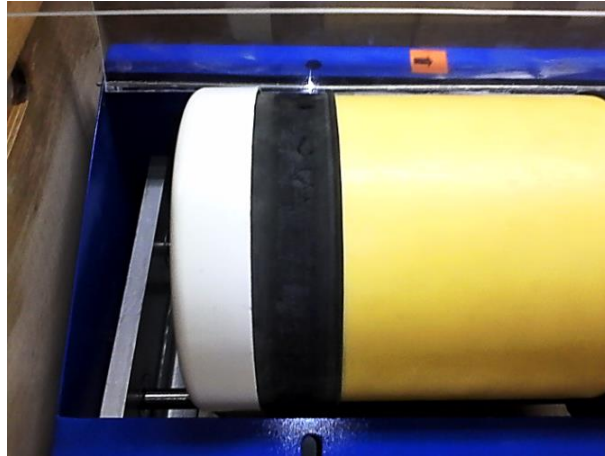


Figura 33. Desgaste en bandas de tracción después de ensayo E6
Fuente: Autores del proyecto.

6. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un prototipo de un molino de bolas con capacidad de producción validada de 20 g de arcilla pulverizada con tamaños de partícula entre 75 μm y 250 μm a partir de una carga inicial de 1000 g con un tiempo de operación promedio de 0.5 horas con el cual se aportó de forma significativa al proceso de caracterización de materiales arcillosos en el Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba reduciendo el tiempo del proceso previo de preparación del material, el cual se realizaba de manera manual en tiempos que oscilaban entre 35 y 45 horas, por lo que esto representa un ahorro de tiempo mínimo de 98 %.

Se aumentó la realización de prácticas de caracterización de arcilla 15 ensayos más de lo habitual, llegando a 20 ensayos por periodo académico.

La cantidad producida se duplicó, pasando de 10 g a 20 g y los tamaños de partícula son ahora de 75 a 250 micras, donde por el método manual era de 180 a 250 micras.

7. RECOMENDACIONES

Automatizar el proceso de molienda, con el objetivo de que el dispositivo pueda pulverizar y tamizar el producto simultáneamente.

Realizar los engranes encargados de la transmisión de potencia, en otro material con las características necesarias para cumplir su función dentro del sistema y que además tenga la capacidad de reducir las emisiones de ruido.

Adicionar al dispositivo un equipo con las características de otro tipo de molino con el fin de fracturar la arcilla seca almacenada en el laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba, hasta llevarla a terrones sueltos con tamaños aproximados de 13 mm. Tamaño que corresponde al tamaño máximo del material de alimentación del molino de bolas.

Buscar un material con las características necesarias de elasticidad, fricción y resistencia a la abrasión, para sustituir las bandas de tracción.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara Valladares J.R., (2008). Diseño práctico de un molino de bolas, Tesis Profesional Ingeniero Mecánico, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Electrica. Unidad Profesional AZCAPOTZALCO, Instituto Politécnico Nacional, Mexico.
- Ángulo García F. X., (2005). Diseño de un Molino pendular de 8000 Kg/h. Departamento de Ingeniería Mecánica. Tesis profesional Ingeniero Mecánico, Escuela Técnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona. España.
- ASOGUAYABAL. (2014). Explotación minera de la arcilla. Asociación de Guayabal. Consultado el 24 de Noviembre del 2014.
- Budynas R.G., Nisbett J.K., (2011). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, novena Edición. Mexico. Mc Graw Hill., México.
- de Carvalho R. M., Tavares L. M., Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model, Minerals Engineering, Volumes 43–44, April 2013, Pages 91-101, ISSN 0892-6875, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.09.008>.

De Miguel et al. (2002) Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. 167 pp.

Duda, W. H., (1997), Manual Tecnológico del cemento. Editores técnicos Asociados S.A., Barcelona, España.

http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_sogamoso/pregrado/minas/documentos/DISExO_DEL_METODO_DE_EXPLORACION_PARA_LA_MINA_DE_ARCILLA_ASOGUAYABAL.pdf

Flowgasket®, (2016). Proveedor de refacciones y servicio a intercambiadores de calor. Hermosillo, Sonora, México. <http://flowgasket.com/especificaciones-tecnicas/propiedades-tecnicas-material-neopreno-cr/>. Consultada el 20 de diciembre del 2016.

Jensen C., Helsel J.D., Short D.R.,(2008) Dibujo y Diseño en Ingeniería, Sexta Edición. Mc Graw Hill.,México

Latexport. ® S.A.S., (2016), productos en Latex y elementos de protección personal. Colombia, consultada el 25 de Agosto de 2016.

Martínez P. (2011). Procesamiento de materiales, Universidad politécnica de Cartagena, Curso: Tecnología Mineralúrgica, Base de Datos, <http://www.ocw.bib.upct.es>. Colombia.

McCabe, W. Operaciones unitarias en ingeniería Química. Ed. McGraw-Hill, 1994.

Montalvo Moya D., (2013). Diseño de un reductor de velocidad para el accionamiento de una máquina de roto moldeo, Tesis Profesional Ingeniero Mecánico, Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, España.

Norma Técnica Colombiana 589 (2000). Método de ensayo para determinar el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados. Colombia.

- Otero A., (2003). Caracterización Operacional Molino Bolas, Laboratorio Computacional. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería Centro de Minería. Chile.
- Pavco ®, (2016). Producción y comercialización de productos para conducción y control de fluidos, geo sintéticos y pisos para la construcción. Catálogo técnico de tubosistemas sanitarios. Colombia. Consultada el 13 de Julio de 2016.
- Peñafiel Calderón, A.B.(2012). Diseño de Sistema de Molienda para Reciclaje seco en la Producción de Láminas de fibro Cemento. Tesis profesional Ingeniero Químico, Escuela Superior Politécnico de Chimborazo, Ecuador.
- Plasticbages Industrial, S.L. (2014). Fabricación y comercialización de plásticos técnicos. Barcelona – España. <http://www.plasticbages.com/caracteristicaspvc.html>. Consultada el 28 de Noviembre del 2014.
- SBM® (2014), SBM Shibang Machinery Co.,Ltd. Shanghai-China. Consultado el 20 de Noviembre de 2014, de <http://www.shibangmachines.com/trituradoras>.
- Solidworks® SP3 v(2014). Software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de [Dassault Systèmes, S.A.](#) Con licencia Solidworks Edu Edition Networks 2015, soporte de entrega RM-SS-042
- Suarez B. (2012). Policloruro de Vinilo, Informe de Laboratorio. Facultad de Química e Ingeniería, Universidad Católica de Argentina U.C.A., Argentina
- Vedat Deniz, Influence of interstitial filling on breakage kinetics of gypsum in ball mill, Advanced Powder Technology, Volume 22, Issue 4, July 2011, Pages 512-517, ISSN 0921-8831, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2010.07.004>.

Velilla Díaz W. (2008). Diseño y validación de un modelo de extrusora de arcilla, tesis para optar por el título de magister en ingeniería mecánica. Universidad del Norte. División de ingenierías. Barranquilla.

XSM® (2014), Shanghai Xuanshi Machinery Co. Fabricante profesional de la minería y la construcción. Consultado el 20 de Noviembre de 2014. Shanghai-China.

9. ANEXOS

ANEXO A. PLANOS CONSTRUCTIVOS DEL DISPOSITIVO

ANEXO B. IMÁGENES DE CONSTRUCCIÓN.
ANEXO B1. Sistema de Transmisión de Potencia.

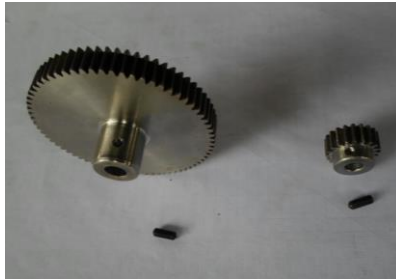


Figura 34. Engranés
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 35. Ejes y rodillos de Tracción
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 36. Rodamientos
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 37. Tambor y bandas de tracción
Fuente: Autores del proyecto.

ANEXO B2. Sistema Estructural.



Figura 38. Carcasas
Fuente: Autores del proyecto.

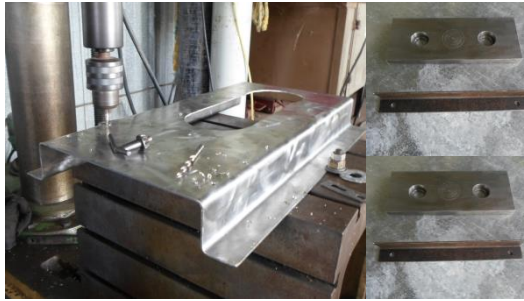


Figura 39. Base y Placas de Soporte
Fuente: Autores del proyecto.

ANEXO B3. Sistema Eléctrico.



Figura 40. Sistema Eléctrico
Fuente: Autores del proyecto.

ANEXO B4. Ensamblados Previos.

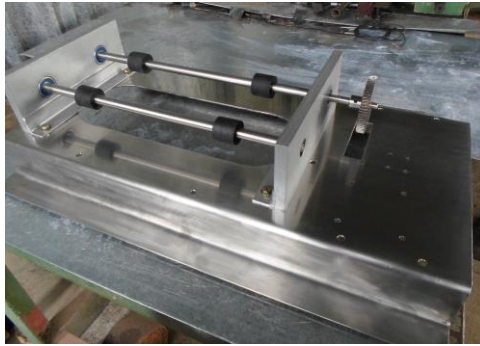


Figura 41. Ensamble de transmisión y soporte
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 42. Ensamble preliminar
Fuente: Autores del proyecto.

ANEXO B5. Ensamble Final.

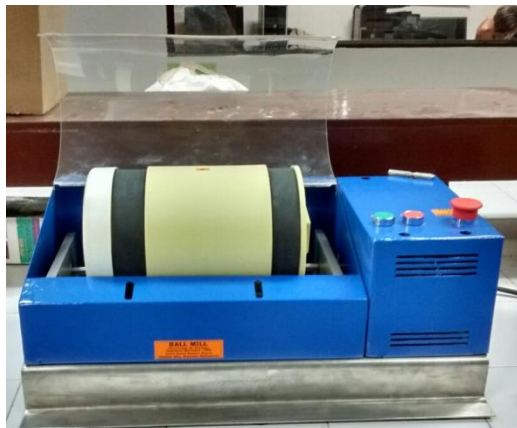


Figura 43. Molino de Bolas.
Fuente: Autores del proyecto.

ANEXO C. IMPLEMENTOS USADOS EN LOS ENSAYOS DE FUNCIONAMIENTO.

ANEXO C1. Implementos del Laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba.



Figura 44. Urna de vidrio para el almacenamiento de arcilla
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 45. Espátulas
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 46. Balanza Digital
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 47. Tamiz Standard #200 (250 μ m) según norma A.S.T.M. E-11
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 48. Tamiz Standard #60 (250 μ m) según norma A.S.T.M. E-11
Fuente: Autores del proyecto.



Figura 49. Tapabocas
Fuente: Autores del proyecto

ANEXO D. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

ANEXO D1. Ficha Técnica.

Tabla 41. Ficha Técnica

MOTOR	
Tipo	Eléctrico – Monofásico
Potencia (W)	18/75
rpm	1500
Frecuencia (Hz)	60
Amperaje (Amp)	1.0
Voltaje (V-AC)	110/115
Refrigeración	Por convección
TRANSMISIÓN	
Tipo	Engranés rectos
Relación	3.5 : 1
Módulo (mm)	1
PIÑÓN	
Diámetro P. (mm)	20
Numero de Dientes	20
Sujeción (Tipo/dimensión)	Prisionero/ Ø1/8" NC x 4mm
RUEDA	
Diámetro P. (mm)	70
Numero de Dientes	70
Sujeción (Tipo/dimensión)	Prisionero/Ø1/8" NC x 4mm
DIMENSIONES Y MASA	
Longitud total (mm)	370
Ancho total (mm)	580
Alto total (mm)	320
Masa sin carga (Kg)	27
SISTEMA DE MOLIENDA	
Tipo	Giratorio
Elementos molidores (Tipo/Dimensiones en mm)	Balines/ ø (23, 17, 6.3)
RPM de trabajo	76.3
Separación de rodillos de tracción en eje (mm)	170
Rodamientos	6200-2RS
OPERACIÓN Y SEGURIDAD	
Encendido y Apagado	Botoneras tipo pulsador
Parada de emergencia	Pulsador con enclavamiento
Fusible (Tipo/Amp.)	Encapsulado interno/ 1.5
Cubierta de cámara de molienda	Semicilíndrica acrílica
Topes antivibratorios	Circulares de neopreno
Punto a tierra	Chasis

Fuente: Autores del proyecto

ANEXO D2. Manual de Uso.

Tabla 42. Manual de Uso.

Ubicación.	<p>Ubicar el equipo sobre un lugar firme, relativamente plano que no produzca desnivel en el equipo.</p> <p>Para un funcionamiento adecuado del equipo, se recomienda que el recinto en el cual se va a operar, se encuentre a una temperatura por debajo de los 22°C.</p>
Desenergizar el equipo.	<p>Cerciorarse de que el equipo se encuentre asilado eléctricamente, ya sea manteniendo el pulsador <i>PARADA DE EMERGENCIA</i> activo, o bien sea con el equipo desconectado del toma corriente. Esto con el fin de evitar accidentes en medio de la manipulación previa al funcionamiento de este.</p>
Preparación de la Cámara de Molienda.	<p>Se procede a levantar cuidadosamente la cubierta de la cámara de molienda, hasta llevarla a tope.</p> <p>Se extrae el tambor, al cual se le retirará la tapa girándola en sentido contrario a las manecillas del reloj.</p> <p>Se introduce 0.9 Kg del material a pulverizar (arcilla seca), el cual debe estar dispuesto en terrones sueltos con tamaños aproximados ≤ 13 mm.</p> <p>Se introducen los cuerpos molidores (bolas) en las cantidades señaladas: 0.45 Kg de bolas con un $\phi = 23$ mm 0,80 Kg de bolas con un $\phi = 17$ mm 0.62 Kg de bolas con un $\phi = 6.3$ mm</p> <p>Se sella el tambor, se agita un poco la carga en su interior y se coloca sobre los rodillos de tracción en la cámara de molienda en el sentido señalado, asegurándose de que éstos estén correctamente en contacto con las bandas del tambor.</p> <p>Por último se cierra la cámara de molienda bajando totalmente la cubierta.</p>
Puesta en Marcha.	<p>Si el equipo se encuentra conectado al toma corriente, se da paso a desenclavar el pulsador <i>PARADA DE EMERGENCIA</i> girándolo en sentido horario, con el fin de cerrar el circuito y de esta manera encender el equipo presionando el pulsador <i>ON</i> de color verde.</p> <p>El ciclo de pulverización está estimado para un tiempo de 30 minutos, transcurrido este tiempo, se procede a apagar el equipo presionando el pulsador <i>OFF</i>, de color rojo.</p>
RECOMENDACIONES ÚTILES PARA EL USO ADECUADO DEL EQUIPO Y SU DURABILIDAD.	<ul style="list-style-type: none"> • No introducir la mano o algún elemento extraño en la cámara de molienda cuando el equipo esté en funcionamiento. Mantener la cubierta siempre abajo. • No encender el equipo si éste se encuentra en desnivel. • En caso de accidente, o al percibir un ruido o un comportamiento extraño en el equipo, presionar rápidamente el pulsador <i>PARADA DE EMERGENCIA</i> el cual desenergizará el equipo completamente. • No exceder el tiempo de molienda. Si requiere un poco más de material pulverizado, al terminar el primer ciclo deje el equipo 20 minutos en reposo, prepare e inicie un nuevo ciclo de molienda. • No exceder las cantidades de material a pulverizar o de cuerpos molidores. • Al extraer el tambor cuando acabe el proceso de molienda, no destaparlo enseguida, se debe colocar en forma vertical con la tapa hacia arriba, y transcurridos 5 minutos proceder a destaparlo. Esto ayudará a reducir las pérdidas del material pulverizado. • Se recomienda reemplazar las bandas de tracción después de 18 ciclos.

Fuente: Autores del proyecto

ANEXO D3. Recomendaciones para inspección de mantenimiento.

Tabla 43. Recomendaciones de Mantenimiento.

COMPONENTE	TAREAS
Engranajes	<ul style="list-style-type: none"> - Lubricar con grasa multipropósito cada 20 horas de trabajo evitando excesos, pero si en una inspección se evidencia que el sistema presenta suciedad o la grasa anterior esta negra evidenciando suciedad realizar limpieza y posterior lubricación. Se recomienda que al lubricar se desarme la CARCASA MOTOR y se realice limpieza interna. - Inspeccionar superficie de los dientes cada 10 horas de trabajo. -Reemplazar cuando se presente picaduras por fatiga superficial, irregularidades en los dientes y o deformaciones en el elemento. -Realizar inspección al presentar juego entre el eje y el engrane causando golpeteo.
Rodamientos	<ul style="list-style-type: none"> -Reemplazar cada 1400 horas de trabajo. -Inspeccionar que los sellos se encuentren en buen estado y que no liberen lubricante. Si este es el caso se recomienda reemplazar los cuatro rodamientos. -Verificar que los ejes roten sin ningún tipo de dificultad. Si presenta signos de frenado, se recomienda cambiar los cuatro rodamientos.
Rodillos de tracción	<ul style="list-style-type: none"> - Inspeccionar cada 8 horas de trabajo, verificando que no ocurra deslizamiento excesivo producto de elementos no deseados como grasas o aceites. - Verificar posición respecto al tambor. - Reemplazar si existe disminución del diámetro nominal menor a 30.0 mm hasta un límite de 26.0 mm, para no afectar la velocidad de rotación -Inspeccionar antes de cada ciclo de trabajo, revisando que no haya elementos sólidos adheridos a ellos. -Verificar que no estén ladeados o en desnivel con respecto al eje, y que luego produzca vibraciones al momento del movimiento.
Bandas de tracción	<ul style="list-style-type: none"> -Inspeccionar antes de cada ciclo de trabajo, revisando que no haya elementos sólidos adheridos a ella. -Reemplazar si presenta rotura o desgaste excesivo. -Se recomienda reemplazar cumplidas 10 horas de trabajo.
Motor eléctrico	<ul style="list-style-type: none"> -Realizar inspección de los cojinetes del eje del motor. -Reemplazar si presenta dificultades al arranque. -Realizar inspección de los componentes eléctricos desarmando la CARCASA MOTOR, verificando estado y realizando limpieza.

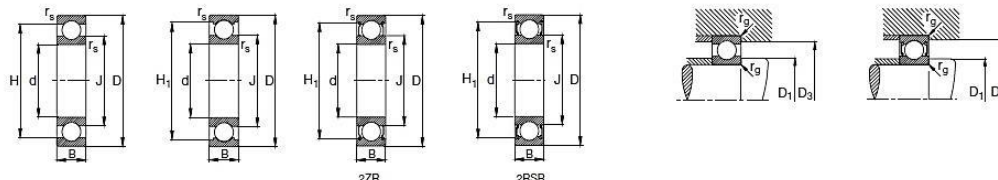
Fuente: Autores del proyecto

ANEXO E. CATÁLOGO DE ALGUNOS COMPONENTES.

ANEXO E1. Catalogo FAG WL 41 520/35 B – Rodamientos Rígidos de bola de una hilera.

Rodamiento mediante el cual se seleccionó la bola de 6.3 mm

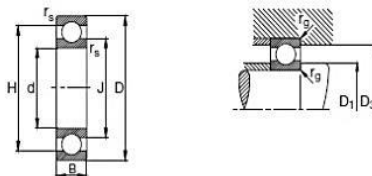
Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera



Eje	Dimensiones							Peso ~ kg	Capacidad de carga		Velocidad límite min ⁻¹	Velocidad de referencia	Denominación abreviada Rodamiento FAG	Medidas auxiliares		
	d mm	D	B	r _s min	H ~	H ₁ ~	J ~		dyn. C kN	stat. C ₀				D ₁ min mm	D ₃ max	r _s max
10	10	26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.019	4.55	1.96	34000	32000	6000	12	24	0.3
	10	26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.019	4.55	1.96	34000	32000	S6000.W203B	12	24	0.3
	10	26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.02	4.55	1.96	19000	28000	6000.2ZR	12	24	0.3
	10	26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.02	4.55	1.96	19000	28000	6000.2RSR	12	24	0.3
	10	26	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.02	4.55	1.96	19000	28000	S6000.2RSR.W203B	12	24	0.3
	10	28	8	0.3	21.4	22.5	14.7	0.024	4.55	1.96	34000		16T00	12	26	0.3
	10	30	9	0.6	24	25	16.6	0.031	6	2.6	32000	28000	6200	14.2	25.8	0.6
	10	30	9	0.6	24	25	16.6	0.031	6	2.6	32000	28000	S6200.W203B	14.2	25.8	0.6
	10	30	9	0.6	24	25	16.6	0.032	6	2.6	28000	28000	6000.2ZR	14.2	25.8	0.6
	10	30	9	0.6	24	25	16.6	0.032	6	2.6	17000		6200.2RSR	14.2	25.8	0.6
	10	30	9	0.6	24	25	16.6	0.034	6	2.6	17000		S6200.2RSR.W203B	14.2	25.8	0.6
	10	30	14	0.6	23.9	24.9	16.6	0.048	6	2.6	17000		62200.2RSR	14.2	25.8	0.6
	10	35	11	0.6	27	28.6	18.1	0.055	8.15	3.45	56000	28000	6300	14.2	30.8	0.6
	10	35	11	0.6	27	28.6	18.1	0.056	8.15	3.45	56000	28000	S6300.W203B	14.2	30.8	0.6
10	35	11	0.6	27	28.6	18.1	0.057	8.15	3.45	22000	28000	6200.2ZR	14.2	30.8	0.6	
10	35	11	0.6	27	28.6	18.1	0.057	8.15	3.45	15000		6300.2RSR	14.2	30.8	0.6	
10	35	11	0.6	27	28.6	18.1	0.058	8.15	3.45	15000		S6300.2RSR.W203B	14.2	30.8	0.6	
12	12	28	8	0.3	23.5	24.4	16.6	0.02	5.1	2.36	32000	28000	6001	14	26	0.3
	12	28	8	0.3	23.5	24.4	16.6	0.021	5.1	2.36	32000	28000	S6001.W203B	14	26	0.3
	12	28	8	0.3	23.5	24.4	16.6	0.02	5.1	2.36	26000	28000	6001.2ZR	14	26	0.3
	12	28	8	0.3	23.5	24.4	16.6	0.022	5.1	2.36	18000		6001.2RSR	14	26	0.3
									4.55	1.96	28000	32000	6000.2ZR	12	24	
									4.55	1.96	19000		6000.2RSR	12	24	
									4.55	1.96	19000		S6000.2RSR.W203B	12	24	

Rodamiento mediante el cual se seleccionó la bola de 17 mm

Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera

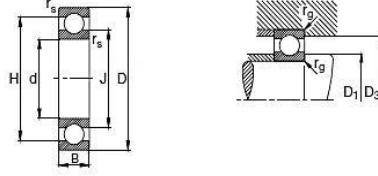


Eje	Dimensiones							Peso ~ kg	Capacidad de carga		Velocidad límite min ⁻¹	Velocidad de referencia	Denominación abreviada Rodamiento FAG	Medidas auxiliares		
	d mm	D	B	r _s min	H ~	J ~	dyn. C kN		stat. C ₀	D ₁ min mm				D ₃ max	r _s max	
140	140	250	42	3	213.7	175.9	8.07	176	166	6000	3600	6228	154	236	2.5	
	140	300	62	4	246.7	191.3	22.3	255	245	5300	3400	6328M	157	263	3	
150	150	225	24	1.1	199.6	176	3.17	91.5	98	6700	3400	16030	156	219	1	
	150	225	35	2.1	200.7	175.1	4.36	122	125	6300	4000	6030	160.2	214.8	2.1	
	150	270	45	3	220.1	191.6	10.3	176	170	5600	3400	6230	164	256	2.5	
	150	320	65	4	266.1	205.6	26.5	280	290	4800	3200	6330M	167	303	3	
160	160	240	25	1.5	212.4	187.3	3.8	102	114	6300	3200	16032	167	233	1.5	
	160	240	36	2.1	214.6	186.2	6.16	134	137	6300	3800	6032M	170.2	229.8	2.1	
	160	290	48	3	244.8	205	14.7	200	204	5600	3000	6232M	174	276	2.5	
170	160	340	68	4	280.9	219.7	31.8	300	325	4300	3000	6332M	177	323	3	
	170	260	26	1.5	228.6	202.3	5.15	122	137	6000	3000	16034	177	253	1.5	
170	170	260	42	2.1	231.2	199.4	7.13	170	173	5600	3400	6034	180.2	249.8	2.1	
	170	310	62	4	260.7	219.1	18.3	212	224	5300	3000	6234M	187	293	3	

102	114	6300	3200	16032	167	233
134	137	6300	3800	6032M	170.2	229.8
200	204	5600	3000	6232M	174	276

Rodamiento mediante el cual se seleccionó la bola de 23 mm

Rodamientos FAG rígidos de bolas de una hilera





Eje	Dimensiones						Peso kg	Capacidad de carga		Velocidad límite min ⁻¹	Velocidad de referencia	Denominación abreviada Rodamiento FAG	Medidas auxiliares		
	d mm	D	B	r _s min	H	J		dyn. C	stat. C ₀				D ₁ min mm	D ₂ max	r _s max
200	200	420	80	5	345,9	274,6	56,6	380	465	3400	2400	6340M	220	400	4
220	220	340	37	2,1	296,1	262,8	11,6	200	240	4300	2200	16044	230,2	329,8	2,1
	220	340	56	3	303,1	256,1	18,8	245	290	4000	2600	6044M	232,4	327,6	2,5
	220	400	65	4	337,6	282,1	37,9	300	355	3600	2200	6244M	237	383	3
	220	460	88	5	382,9	299,4	73,7	440	560	3200	2000	6344M	240	440	4
240	240	360	37	2,1	317,4	283,1	12,7	204	255	3800	2000	16048	250,2	349,8	2,1
	240	360	56	3	321,9	278,8	20,5	255	315	3800	2400	6048M	252,4	347,6	2,5
	240	440	72	4	369,6	309,9	51,3	360	475	3400	2000	6248M	257	423	3
	240	500	95	5	411,3	326,7	96,4	465	620	3000	1900	6348M	260	460	4
260	260	400	44	3	351,2	310	19,1	236	310	3600	1900	16052	272,4	387,6	2,5
	260	400	65	4	356,9	304,6	29,8	300	390	3400	2200	6052M	274,6	385,4	3
	260	480	80	5	402,4	337,3	68,4	405	560	3000	1800	6252M	280	460	4
								236	310	3600	1900	16052	272,4	387,6	
								300	390	3400	2200	6052M	274,6	385,4	

ANEXO E2. Catalogo Tubosistemas Sanitaria PVC PAVCO

Portafolio de Productos

Tuberías Sanitarias PAVCO

Diámetro Nominal	Referencia	Diámetro Exterior Promedio		Diámetro Interior Promedio		Espesor de Pared Mínimo		Peso kg/m
		mm	pulg.	mm	pulg.	mm	pulg.	
1.1/2	2900319	48.26	1.90	42.68	1.69	2.79	0.11	0.64
2	2902515	60.32	2.37	54.48	2.14	2.92	0.11	0.84
3	2902517	82.56	3.25	76.20	3.00	3.18	0.12	1.27
4	2900331	114.30	4.50	107.70	4.24	3.30	0.13	1.84
6	2900336	168.28	6.62	160.04	6.30	4.12	0.16	3.41
 <p>NTC 1087</p>								
1.1/2	2900338	48.26	1.90	45.22	1.78	1.52	0.06	0.36
2	2900341	60.32	2.37	56.76	2.14	1.78	0.07	0.53
3	2900344	82.56	3.25	79.00	3.00	1.78	0.07	0.73
4	2900347	114.30	4.50	110.08	4.24	2.11	0.08	1.20
 <p>NTC 1087</p>								
2	2900323	60.32	2.37	54.48	2.14	2.92	0.11	0.84
3	2900326	82.56	3.25	76.20	3.00	3.18	0.12	1.27
4	2900330	114.30	4.50	107.70	4.24	3.30	0.13	1.84
6	2900335	168.28	6.62	160.04	6.30	4.12	0.16	3.41

Tuberías Sanitarias y Aguas Lluvias

Presión de Prueba: 0.35 MPa - 50 PSI

Tuberías Ventilación

Tuberías Sanitarias Novatec

La longitud normal de los tubos es de 6 mt.

ANEXO E3. Ficha técnica de guantes Industriales Latexport. S.A.S.

	LATEXPORT S.A.S.	Fecha última versión
	FICHA TECNICA DEL PRODUCTO	13/02/2015 Versión N° 9

*Nombre del producto: Guante Industrial calibre 50

*Talla: 7, 8, 9 y 10

*Presentación Comercial: Bolsa por par de guantes, 15 cm x 35 cm, empaque manual.

*Características Generales:

Fabricados en látex de caucho natural, de acabado uniforme, libres de decoloración, áreas delgadas, partículas incrustadas, pegajosidad y otras imperfecciones que puedan afectar su utilidad.

El producto es libre de poros o perforaciones.

Corresponde anatómicamente al contorno natural de la mano dentro de la amplitud requerida para su utilización.

*Apariencia física:

- La totalidad de la superficie, tanto interior como exteriormente, es de color negro.
- En la palma de la mano, los dedos, y la parte superior presenta un labrado característico que le genera propiedades antideslizantes importantes.
- Su espesor elevado genera resistencia a la abrasión, la tracción y el desgarre.
- Su diseño y sus características estructurales hacen ideal este producto para las labores de trabajo pesado, debido a que su ergonomía es propia de un guante industrial.
- Aunque el producto de línea es negro, bajo pedidos especiales puede elaborarse este producto en presentación monocolor amarillo, blanco, rojo, azul, y verde, ó en acabado bicolor, combinando el negro exteriormente con el amarillo, blanco, verde, azul o rojo, de forma interna.
- Para cualquier duda comunicarse con nuestro representante de ventas autorizado.

*Usos:

Para múltiples usos y protección en las labores de cocina, jardinería o de aseo.

Por sus propiedades antideslizantes, su alta resistencia a los detergentes, a la abrasión y al desgarre, es apto para la limpieza del hogar como para las labores que lo requieran en la industria.

Referencia desarrollada para trabajos más pesados en todo tipo de industrias donde es importante la durabilidad del producto en el tiempo, y donde se requiere un alto nivel de aislamiento térmico junto con condiciones más exigentes de tensión.

*Características Microbiológicas:

Producto para uso externo, No aplica.

*Vida útil esperada:

Se espera una vida útil de 16 usos continuos de 8 horas, sin ser sometido a solventes orgánicos, varsol y/o thinner, o fuego directo.

Es importante aclarar que este producto no ha sido desarrollado para labores que generen pinchazos o cortes sobre la superficie del guante.

Ficha técnica de guantes Industriales Latexport. S.A.S.

	LATEXPORT S.A.S.	Fecha última versión
	FICHA TECNICA DEL PRODUCTO	13/02/2015
		Versión N° 9

*Características Estructurales y Dimensionales:

Los guantes tienen las siguientes especificaciones

CARACTERISTICAS	ESPECIFICACIÓN NORMA DE REFERENCIA, NTC 1726	
Largo mm.		
Talla 7 - 7 1/2	295 ± 5	mínimo 260
Talla 8 - 8 1/2	295 ± 5	mínimo 260
Talla 9 - 9 1/2	295 ± 5	mínimo 260
Talla 10	295 ± 5	mínimo 260
Ancho de la palma (ancho) mm.		
Talla 7 - 7 1/2	92 ± 8	92 ± 8
Talla 8 - 8 1/2	103 ± 8	103 ± 8
Talla 9 - 9 1/2	115,5 ± 8,5	115,5 ± 8,5
Talla 10	127 ± 5	127 ± 5
Peso promedio par/gramos		
Talla 7 - 7 1/2	120 ± 10	N/A
Talla 8 - 8 1/2	135 ± 10	N/A
Talla 9 - 9 1/2	145 ± 12	N/A
Talla 10	165 ± 12	N/A
Calibre mm.		
Superficie de la palma NO labrada	0,90 ± 0,03	0,89 min
Resistencia mínima a la tensión, Mpa	CUMPLE Δ	20 min
Elongación mínima al punto de rotura, %	CUMPLE Δ	600%
Módulo mínimo al 300%, Mpa	CUMPLE Δ	1,0 Mínimo 2,5 Máximo
Resistencia al desgarre KN/m	CUMPLE Δ	30 Mínimo

*Muestra fotográfica del producto



Empaque Manual

Características del producto después de un envejecimiento térmico durante 168 horas a 70 °C +/- 1, en %

Variación máxima de la resistencia a la tensión	CUMPLE Δ	Máx- 25%
Variación máxima de la resistencia a la rotura	CUMPLE Δ	Máx- 20%

Características del producto después de ser sometido a la acción de Detergentes, %

Variación mínima a la tensión en Mpa	N/A	N/A
Elongación mínima al punto de rotura, %	N/A	N/A

Δ Acorde a informe de ensayo N° 09995 realizado por el ICIPC

*Condiciones de Almacenamiento:

El producto deberá ser almacenado en lugar oscuro, fresco y seco, donde no esté expuesto a daños mecánicos ni a temperaturas mayores de 38°C. Los arrumes deberán manejarse máximo de 4 cajas.

*Manejo y controles especiales durante la distribución y comercialización:

Las cajas que contienen los guantes deberán manejarse con cuidado, sin voltearlas, ni golpearlas. Hacer un manejo adecuado de inventarios para una buena rotación, y así despachar primeramente los productos que lleven un mayor tiempo almacenado, y posteriormente a los que recién se ingresan.

Medellín: Calle 34 B No 66 A - 44 Interior 202
Tel: (574) 3229288 ext. 115
Planta y oficinas: Kilómetro 24 autopista Medellín – Bogotá / Guarne Antioquia.
PBX: (574) 3229288

ANEXO E4. Catálogo de Accesorios PVC PAVCO



Adaptadores de Limpieza	
Diámetro Nominal pulg.	Referencia
2	2900678
3	2900680
4	2900682
6	2900686

* El accesorio incluye el tapón de limpieza y el anillo de caucho

FICHA TÉCNICA

Atributo	Detalle
Tipo	Accesorios sanitarios PVC
Medidas	11 cm de largo
Características	Adaptador de gran resistencia, fácil de instalar, tapa en rosca con cavidad hacia afuera para fácil manipulación, diseñado con de la mejor calidad para resistir grandes presiones.
Material	PVC
Diámetro en pulgadas	6
Uso	Adaptador para limpieza de tubería de sanitarios que detiene el fluido de desechos sólidos gracias a que sirve como tapa a presión
Color	Amarillo

UNIONES

Calidad

Siguiendo los métodos de prueba de la Norma ICONTEC 1087 y ASTM 2665 las especificaciones de calidad son las siguientes:

1. Absorción de Agua.

Los Tubosistemas no aumentarán de peso en más de 0.3%.

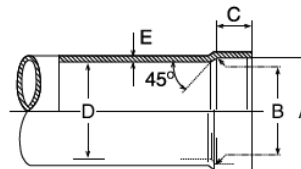
2. Impacto.

La mínima resistencia al impacto será de 81 J a 23°C (73°F).

3. Soldadura.

Las uniones de tubos y accesorios hechas con soldadura líquida no tendrán escapes, cuando sean sometidas a una presión interna de 50psi.

Tabla II Accesorios



Pulgadas

Diámetro Nominal	A		B		C (min)	D (min)	E (min)
1.1/2	1.915	±0.012	1.89	±0.012	0.69	1.69	0.11
2	2.390	±0.012	2.37	±0.012	0.75	2.16	0.11
3	3.270	±0.015	3.24	±0.015	1.50	3.02	0.12
4	4.520	±0.015	4.49	±0.015	1.75	4.26	0.13
6	6.647	±0.030	6.61	±0.030	3.00	6.32	0.16

Milímetros

Diámetro Nominal	A		B		C (min)	D (min)	E (min)
1.1/2	48.64	±.31	48.13	±.31	17.45	43.05	2.79
2	60.71	±.31	60.20	±.31	19.05	54.86	2.92
3	83.06	±.38	82.42	±.38	38.10	76.71	3.18
4	114.81	±.38	114.17	±.38	44.45	108.20	3.30
6	168.83	±.76	168.02	±.76	76.20	160.66	4.15

ANEXO E5. Especificaciones de rodamiento 6200 2RS C3 PFI

Detalle del producto

[Volver a lista de productos](#)

Número PFI	6200-2RS C3
Aplicación	DELCO 28MT (arrancador, armadura), MOTOROLA todos los modelos (alternador, aro final), NIKKI All modelos (motor de arranque, la armadura), NIPPONDENSO OSGR (arrancador, armadura), PARIS RHONE todos los modelos (alternador, aro final)
Intercambio	Allis Chalmers 272031, Caterpillar 3T7523, Delco 10456462, Motorola 11-23, Nippondenso 949100-0570, Toyota 90099-10107
Descripción	Estándar
Posición	alternador (anillo final), arranque (armadura)
Nota	entrenador, eje y eje de bicicleta
Ø interior	10.000
Ø exterior	30.000
Ancho 1	9.000
Ancho 2	
Peso (g)	32
Cantidad del cartón	200
Foto	