

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN
DISPOSITIVO DE ALTA CAPACIDAD PARA MEZCLAR POLVOS DE
DISTINTOS MATERIALES**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Bachilleres:
Muzziotti G., Jose R.
Tutino R., Alessandro.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, Junio 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO, FABRICACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN
DISPOSITIVO DE ALTA CAPACIDAD PARA MEZCLAR POLVOS DE
DISTINTOS MATERIALES**

Tutor Académico: Prof. Andrea Scagni

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Bachilleres:
Muzziotti G., Jose R.
Tutino R., Alessandro.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, Junio 2015



ACTA

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

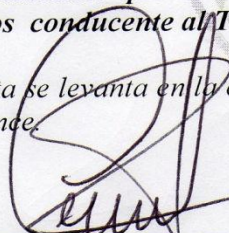
Alessandro Tutino y José Roberto Muzziotti

Titulado

“Diseño, Fabricación y Puesta en Funcionamiento de un Molino de Bolas de Alta Capacidad”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Acta se levanta en la ciudad de Caracas, al primer día del mes de junio del año dos mil quince.


Prof. Crisanto Villalobos
Jurado



Prof. Andrea Scagni
Tutor


Prof. José Gregorio La Riva
Jurado

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios, a mi padre y a mi madre, que con su ejemplo me orientaron por el buen camino que me condujeron al logro de mis objetivos académicos.

A mis abuelos y a mi novia por su amor y apoyo incondicional.

A muchos de mis amigos que de una u otra manera me apoyaron y me ayudaron cuando se presentaron momentos difíciles a lo largo de mis estudios.

Alessandro Tutino

A mis padres, Fátima y Roberto, mi abuelo manuel por todo lo que han dado a lo largo de mi vida, por todo el amor y enseñanzas que me han brindado y que me permiten alcanzar esta meta.

A mi hermano José Ricardo, por ser más que un hermano, un compañero de vida con quien se que puedo contar . Esta ahí en todo momento.

A mis abuelos Antonia, Silvia y Roberto que desde arriba se que estarán orgullosos de mi.

A mi abuelo Manuel , por ser ese abuelo modelo que toda persona desea tener. Sabio y bondadoso.

A mi novia Katherine, por representar otro motivo tan importante como mis padres, hermanos y abuelos para alcanzar mis metas, y ser mejor cada día.

A demás familiares y amigos que siempre estuvieron pendientes de mí a lo largo de este trabajo, ofrezco disculpas por no mencionarlos a cada uno.

José Roberto Muzziotti Goncalves

AGRADECIMIENTOS

A la Ilustre Universidad Central de Venezuela por formarnos como profesionales y personas íntegras. No habrá manera de retribuir todo lo que aprendimos en ella.

Al profesor Andrea Scagni, al Ingeniero Miguelángel Moreno, a Sandro Scagni y al personal de Plasmatec Ingenieros por la colaboración y apoyo en la construcción de la máquina.

Al profesor Crisanto Villalobos por darnos su ayuda voluntaria en todo momento a lo largo de este trabajo.

A Hamyit, por su gran ayuda hacia todos los tesisistas del Departamento.

A la profesora María de los Ángeles Rodríguez de Prato.

Muzziotti G., Jose R.
Tutino R. Alessandro

DISEÑO, FABRICACIÓN Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE ALTA CAPACIDAD PARA MEZCLAR POLVOS DE DISTINTOS MATERIALES

Tutor Académico: Prof. Andrea Scagni. Tesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2015. pp

PALABRAS CLAVE: Pulvimetalurgia, Aleación Mecánica, Mezclado, Polvos Cerámico-Metálicos, Molino de Bolas

RESUMEN

En el presente informe se presenta el diseño y fabricación un dispositivo de alta capacidad para la aleación y mezclado de polvos cerámico metálicos, con una capacidad de producción entre 10 a 20 kilogramos de material. Se realizaron las etapas de ingeniería básica, procura de materiales y construcción, se aplicó la metodología del diseño conceptual, para generar distintas ideas y a través de una matriz de decisión seleccionar la más conveniente, la cual fue desarrollada y aplicada la ingeniería de detalle para su posterior fabricación. La premisa de este proyecto fue la utilización de materiales y tecnologías de bajo costo y existentes en el país. Los materiales empleados para su construcción fueron es su mayoría aceros al carbono. El maquinado y el ensamblaje de las piezas, así como la prueba de la maquinase realizo en las instalaciones de la empresa PLASMATEC C.A. El funcionamiento de la maquina se basa en los principios de la aleación mecánica para la producción de materiales compuesto de interés científico y comercial. El dispositivo creado fue un molino de bolas de baja energía que cumple la función de mezclado de polvos de distintos materiales y distintas granulometrías, consta básicamente de un cilindro recipiente cilíndrico que puede o no contener elementos esféricos en su interior donde se depositan los polvos para su posterior dispersión y mezclado a través del movimiento de rotación del contenedor.

Muzziotti G., Jose R
Tutino R. Alessandro

DESIGN, CONSTRUCTION AND COMMISSIONING OF A DEVICE FOR HIGH CAPACITY FOR DIFFERENT MIX POWDER MATERIALS

Academic Tutor: Prof. Andrea Scagni. Thesis. Caracas, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. 2014. Pp

KEY WORDS: powder metallurgy, mechanical alloying, blending, ceramic-metal powders, ball mill

ABSTRACT

This report presents the design and manufacture of a high-capacity alloy metal and ceramic powders mixed with a production capacity between 10-20 kilograms of material. The steps of basic engineering, procurement of materials and construction were applied, the methodology of conceptual design was applied to generate different ideas and through a decision matrix the most convenient was selected, which was developed and applied detailed engineering for subsequent manufacture. The premise of this project was the use of materials and low-cost technologies existing in the country. The materials used for its construction were mostly carbon steels. The machining and assembly of parts, as well as proof of maquinase were made at the company Plasmatec CO. The operation of the machine is based on the principles of mechanical alloying for the production of composite materials with scientific and commercial interest. The device created was a low energy ball mill that serves like a powder mixing of different materials and particle sizes, basically consists of a cylindrical vessel or cylinder may contain spherical elements inside which the powders are deposited to subsequent dispersion and mixing by rotation of the container.

INDICE

| | |
|---|------|
| RESUMEN | vi |
| ABSTRACT | vii |
| LISTA DE FIGURAS | xiii |
| INTRODUCCION | 1 |
| CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 5 |
| 1.1 FORMULACION DEL PROBLEMA | 5 |
| 1.2 OBJETIVOS | 6 |
| 1.2.1 OBJETIVO GENERAL | 6 |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS..... | 6 |
| 1.3 MOTIVACION | 7 |
| 1.4 ALCANCES | 8 |
| CAPITULO 2. MARCO TEORICO | 9 |
| 2.1 PULVIMETALURGIA | 9 |
| 2.2 PROCESOS PARA LA PRODUCCION DE LOS POLVOS METALICOS..... | 10 |
| 2.2.1 ATOMIZACION | 10 |
| 2.2.2 REDUCCION QUIMICA | 11 |
| 2.2.3 ELECTROLISIS | 12 |
| 2.3 MEZCLADO Y COMBINACION | 12 |
| 2.4 ALEADO MECANICO | 14 |
| 2.4.1 PROCESAMIENTO DE MATERIALES AVANZADOS POR MOLIENDA O ALEADO MECANICO | 15 |
| 2.4.2 MATERIALES PRODUCIDOS POR AM-MM | 16 |

| | |
|---|----|
| 2.4.3 EL PROCESO DE ALEADO MECANICO | 17 |
| 2.4.3.1 MATERIA PRIMAS | 17 |
| 2.4.3.2 TIPOS DE MOLIDOS | 17 |
| 2.4.3.2.1 MOLINO VIBRATORIO | 18 |
| 2.4.3.2.2 MOLINO PLANETARIO | 18 |
| 2.4.3.2.3 MOLINO ATRITOR | 19 |
| 2.4.3.2.4 MOLINO ROTATORIO | 20 |
| 2.4.3.3 SELECCION DEL TIPO DE MOLINO | 21 |
| 2.4.3.4 VARIABLES DEL PROCESO | 22 |
| 2.4.3.4.1 TIPO DE MOLINO | 22 |
| 2.4.3.4.2 CONTENEDOR DE MOLIENDA | 23 |
| 2.4.3.4.3 VELOCIDAD DE MOLIENDA | 23 |
| 2.4.3.4.4 TIEMPO DE MOLIENDA | 24 |
| 2.4.3.4.5 MEDIOS DE MOLIENDA | 24 |
| 2.4.3.4.6 RELACION PESO DE BOLAS PESO DE MUESTRA..... | 25 |
| 2.4.3.4.7 LLENADO DEL VIAL | 25 |
| 2.4.3.4.8 AGENTES DE CONTROL DEL PROCESOS | 26 |
| 2.4.4 MECANISMO DEL ALEADO Y MOLIENDA MECANICA | 27 |
| 2.4.5 TEORIA DE CONMINUCION | 29 |
| 2.5 TERMOROCIADO | 31 |
| 2.6 CARBURO DE WOLFRAMIO | 32 |
| 2.7 NANOTUBOS DE CARBONO | 33 |
| 2.7.1 DISPERSION DE NANOTUBOS DE CARBONO | 33 |

| | |
|---|----|
| 2.7.1.1 METODOS MECANICOS | 34 |
| 2.7.1.1.1 ULTRASONIDO | 34 |
| 2.7.1.1.2 MEZCLA POR IMPACTO-MOLINO DE BOLAS..... | 37 |
| 2.7.1.1.3 MOLIENDA POR FROTAMIENTO | 38 |
| 2.7.1.1.4 MEZCLADO DE ALTO CIZALLAMIENTO | 38 |
| 2.7.2 METODOS QUIMICOS | 39 |
| 2.7.2.1 TRATAMIENTOS ACIDOS | 40 |
| 2.7.2.2 USO DE SURFACTANTES | 40 |
| CAPITULO 3. MARCO METODOLOGICO | 41 |
| 3.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA | 41 |
| 3.2 TORMENTAS DE IDEAS | 41 |
| 3.3 PERFECCIONAMIENTO DEL PROBLEMA | 42 |
| 3.4 ANALISIS | 50 |
| 3.5 MATRIZ DE PRIORIZACION | 51 |
| 3.6 PROPUESTA SELECCIONADA | 52 |
| 3.7 REALIZACION | 52 |
| CAPITULO 4. PROCESO DE DISEÑO | 54 |
| 4.1 ESPECIFICACIONES Y REQUERIMIENTOS | 54 |
| 4.1.1 DIMENSIONAMIENTO DEL MOLINO | 54 |
| 4.1.2 CAPACIDAD DE TRABAJO DEL MOLINO | 54 |
| 4.1.3 CAPACIDAD TOTAL DEL MOLINO | 56 |
| 4.1.4 DIMENSIONES DEL CONTENEDOR | 56 |

| | |
|--|----|
| 4.1.5 TAMAÑO MAXIMO DE LOS ELEMENTOS MOLEDORES | 57 |
| 4.1.6 VELOCIDAD CRITICA | 58 |
| 4.1.7 VELOCIDAD DE LOS RODILLOS | 60 |
| 4.2 DISEÑO DETALLADO | 61 |
| 4.2.1 DISEÑO DEL CONTENEDOR | 61 |
| 4.2.2 DISEÑO DE ALOJAMIENTO | 62 |
| 4.2.3 DISEÑO DE AGUJEROS PARA LOS TORNILLOS | 63 |
| 4.2.4 TAPA DEL RECIPIENTE | 64 |
| 4.2.5 DISEÑO DE LOS EJES | 65 |
| 4.2.6 DURABILIDAD DE LA SUPERFICIE | 73 |
| 4.2.7 VELOCIDAD CRITICA DE LOS EJES | 74 |
| 4.2.8 SELECCION DE CHUMACERA | 76 |
| 4.2.9 DISEÑO DE LOS PERNOS SUJETADORES DE LA CHUMACERA | 78 |
| 4.2.10 POTENCIA NETA MOLINO | 78 |
| 4.2.11 DISEÑO DE TRANSMISION | 80 |
| CAPITULO 5. FABRICACION | 85 |
| 5.1 CONSTRUCCION DEL MOLINO DE BOLAS | 85 |
| 5.2 MONTAJE DEL EQUIPO | 89 |
| 5.3 PROCEDIMIENTO DE OPERACION DEL EQUIPO | 91 |
| 5.4 MANTENIMIENTO | 91 |
| 5.4.1 MANTENIMIENTO DE OPERACION | 92 |
| 5.4.2 MANTENIMIENTO DE LA MAQUINA | 93 |
| 5.4.3 MANTENIMIENTO DEL MOTOR | 93 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.4 PLAN DE MANTENIMEINTO ANUAL PARA EL MOLINO | 93 |
| 5.5 SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL | 95 |
| CONCLUSIONES | 96 |
| RECOMENDACIONES | 97 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 98 |
| ANEXOS | 100 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1. ESQUEMA DEL PROCESO DE METALURGIA DE POLVOS | 10 |
| FIGURA 2. ATOMIZACIÓN POR AGUA Y GAS | 11 |
| FIGURA 3. VARIOS DISPOSITIVOS DE MEZCLADO Y COMBINACIÓN: (A) TAMBOR ROTATORIO, (B) DOBLE CONO ROTATORIO, (C) MEZCLADOR DE TORNILLO Y (D) MEZCLADOR DE PALETAS | 13 |
| FIGURA 4. MOLINO PLANETARIO | 19 |
| FIGURA 5. MOLINO ATRITOR | 20 |
| FIGURA 6. MOLINO ROTATORIO | 21 |
| FIGURA 7. COLISIÓN ENTRE BOLA-POLVO-BOLA, DE LA MEZCLA DE POLVOS DURANTE EL ALEADO MECÁNICO | 27 |
| FIGURA 8. ESQUEMAS DEL PROCESO AM | 28 |
| FIGURA 9. FRACTURA DE PARTÍCULAS SEGÚN LA INTENSIDAD DE ENERGÍA | 29 |
| FIGURA 10. EFECTO DE LA APLICACIÓN DE ONDAS DE ULTRASONIDO EN LA DISPERSIÓN DE NANOTUBOS DE CARBONO EN SOLUCIÓN ACUOSA AL 1% EN PESO. A) SIN ULTRASONIDO. B) CON ULTRASONIDO | 35 |
| FIGURA 11. BANCO DE BAÑO ULTRASÓNICO | 36 |
| FIGURA 12. SONDA ULTRASÓNICA | 36 |
| FIGURA 13. MOLIENDA POR CIZALLAMIENTO (ROTOR) | 39 |
| FIGURA 14. MEZCLADOR VIBRATORIO | 42 |
| FIGURA 15. MOLINO PLANETARIO | 43 |
| FIGURA 16. MOLINO ATRITOR | 43 |
| FIGURA 17. BANCO DE BAÑO ULTRASÓNICO | 44 |

| | |
|--|----|
| FIGURA18. SONDA ULTRASÓNICA | 45 |
| FIGURA19. MEZCLA POR IMPACTO- MOLINO DE BOLAS (TAMBOR ROTATORIO) | 45 |
| FIGURA 20. MEZCLA Y MOLIENDA POR FROTAMIENTO | 46 |
| FIGURA 21. MEZCLADO DE ALTO CIZALLAMIENTO | 47 |
| FIGURA 22. MEZCLADOR TÚRBULA | 47 |
| FIGURA 23. MEZCLADOR DE TORNILLO | 48 |
| FIGURA 24. MEZCLADOR DE PALETAS | 49 |
| FIGURA 25. MEZCLADO POR AIRE | 50 |
| FIGURA 26. DISEÑO PRELIMINAR | 53 |
| FIGURA 27. ESQUEMA DE PARTÍCULA DENTRO DEL MOLINO | 59 |
| FIGURA 28. DISPOSICIÓN DEL CONTENEDOR Y LOS RODILLOS | 61 |
| FIGURA 29. ALOJAMIENTO O-RING | 63 |
| FIGURA 30. CONTENEDOR Y ALOJAMIENTO | 64 |
| FIGURA 31. TAPA DEL RECIPIENTE | 65 |
| FIGURA 32. DISPOSICIÓN DEL CONTENEDOR | 65 |
| FIGURA 33. DCL CONTENEDOR | 66 |
| FIGURA 34. DCL (SOLICITUD DE FUERZAS) | 67 |
| FIGURA 35. DISPOSICIÓN FUERZAS SOBRE LOS EJES EN SOFTWARE INVENTOR | 69 |
| FIGURA 36. DISPOSICIÓN FUERZAS SOBRE LOS EJES EN SOFTWARE INVENTOR | 69 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 37. DISEÑO PROPUESTO DEL EJE | 69 |
| FIGURA 38. DIAGRAMA FUERZA CORTANTE PLANOS YZ | 70 |
| FIGURA 39. DIAGRAMA FUERZA CORTANTE PLANOS XZ | 70 |
| FIGURA 40. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR PLANOS YZ | 71 |
| FIGURA 41. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR PLANOS YZ | 71 |
| FIGURA 42. REPRESENTACIÓN DE LA DEFLEXIÓN EN EL EJE | 75 |
| FIGURA 43. GRAFICA DE LA DEFLEXIÓN TOTAL RESULTANTE | 76 |
| FIGURA 44. DCL DEL MOLINO | 78 |
| FIGURA 45. ESQUEMA DE LA TRASMISIÓN | 80 |
| FIGURA 46. TENSIÓN DE LA BANDA | 84 |
| FIGURA 47. TORNEADO INTERNO DEL CONTENEDOR | 86 |
| FIGURA 48. VISTA FRONTAL TAPA DE RECIPIENTE | 86 |
| FIGURA 49. ROSCADO INTERNO | 87 |
| FIGURA 50. CONTENEDOR ENSAMBLADO..... | 87 |
| FIGURA 51. RODILLOS | 87 |
| FIGURA 52. BANCO SOPORTE | 87 |
| FIGURA 53. ENSAMBLADO DEL MOLINO | 91 |
| FIGURA 54. VISTA FINAL DE LA MAQUINA..... | 91 |
| FIGURA 55. POTENCIA NETA | 103 |
| FIGURA 56. TUBO MECANICO... | 105 |

INTRODUCCIÓN

En las actividades industriales, encontramos que el mantenimiento de herramientas, equipos y maquinarias es un gran problema, y se busca disminuir el desgaste o recuperar las piezas desgastadas, ya que significa un menor costo, por lo tanto, es ideal conocer el problema y como recuperar las piezas. Ha sido de vital interés a lo largo de la evolución de los materiales, que sus propiedades sean autosuficientes a la hora de ser exigidos en cada una de las aplicaciones prácticas donde son utilizados. Los materiales compuestos son una alternativa para suplir tales exigencias y su producción a través de los procesos pulvimetalúrgicos y sus novedosas variaciones hacen que se orienten las investigaciones no solamente hacia su obtención sino hacia su producción, porque se reconoce la influencia del proceso productivo en las propiedades del material.

El enfoque en la pulvimetalúrgia se basa en la aleación mecánica (A.M), cuyo principal atractivo radica en que la aleación se produce en estado sólido y genera configuraciones con estructuras desde materiales muy finos hasta nanoestructurados y desde materiales cristalinos hasta los amorfos que ayudan a mejorar la tenacidad en el material final o aleado.

Se han realizado investigaciones durante los últimos años que muestran que la mejora de las propiedades superficiales se traduce en aumento de la vida útil de las piezas en servicio, estas mejoras superficiales se producen principalmente a través de la técnica del rociado térmico. El rociado térmico es un grupo de procesos en el que se funde un material en polvo hasta que llegue a su fase líquida, por medio de la energía térmica procedente de una combustión o un arco eléctrico, y que por medio de un gas comprimido se aceleran las partículas del material para rociarlas sobre un sustrato. Hoy en día, la técnica de rociado de alta velocidad – oxígeno – combustible (HVOF) es muy utilizada por ser muy eficiente.

Los polvos de carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co) son utilizados frecuentemente en aplicaciones de recubrimientos debido a que aportan altos valores de dureza y de resistencia al desgaste, además buena cohesión, poca tendencia a formar fases frágiles y baja porosidad cuando son depositados por vía HVOF.

También con el avance de la nanotecnología se han logrado producir materiales como los nanotubos de carbono que al ser mezclados con otros materiales, produce una mejora significativa en sus propiedades mecánicas.

Da Conceicao y Olivo (2011) mezclaron 0,35% de nanotubos de carbono con partículas micrométricas de WC-12%Co en un molino de bolas para evaluar la influencia que tiene el procedimiento de mezclado sobre la resistencia al desgaste y propiedades mecánicas de recubrimientos depositados mediante la técnica HVOF sobre un acero AISI 1020. Realizaron ensayos de desgaste por abrasión, desgaste por deslizamiento en arreglo de bloque sobre anillo, desgaste por deslizamiento en arreglo de bola sobre disco y la dureza estática promedio obtenida por técnicas de microindentación. Determinaron que el tiempo de mezclado de los nanotubos de carbono con los polvos WC-12%Co microestructurados influyen significativamente. El tiempo de mezclado de 36 horas fue el que presentó mejores resultados al ofrecer la mejor dispersión de los nanotubos de carbono en la mezcla.

Figueroa y Santoyo (2013) evaluaron la influencia en las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste de recubrimientos de WC-12%Co al ser mezclados con 0,35% de nanotubos de carbono mediante un molino de bolas, la muestra sometida a 36 horas de mezclado posteriormente depositados sobre un sustrato de acero AISI 1020. Realizaron ensayos y concluyeron que la adición de nanotubos de carbono es responsable de las mejoras. La condición que presentó los mejores resultados fue la muestra sometida a 36 horas de mezclado reforzada con nanotubos de carbono, demostrando la mejor distribución de nanotubos de carbono.

Singh y colaboradores en el 2009, utilizaron un molino de bolas para el mezclado durante 7 días de 1% y 2% de CNT para reforzar Cr_3C_2 , luego efectuaron la proyección

térmica por plasma, obteniendo que para la muestra reforzada con 2% de CNT mejoraba 45% la resistencia al desgaste y 40% la dureza con respecto al Cr_3C_2 original.

Bakshi y colaboradores (2009) reforzaron con 5% y 10% de CNTs mezclado con un molino de bolas durante 48 horas una aleación de aluminio y silicio y obtuvieron mejoras en el módulo de elasticidad de 19% y 39%, y en la resistencia a la fluencia en 17,5% y 27% respectivamente para cada caso.

Shi y colaboradores (2008), , mezclaron con un molino de bolas en solución de etanol por un tiempo de 10 horas, 0,4%, 0,8% y 1,6% de nanotubos de pared múltiple (MWCNTs) recubiertas con carburo de tungsteno con un recubrimiento de polvos de WC-10%Co . Concluyeron que el recubrimiento reforzado con 0,4% de MWCNTs fue el que presentó los mejores valores respecto al resto de los estudiados.

Esawi y Morsi (2007) demostraron que mezclar CNT con polvos de aluminio mediante un molino de jarras durante 48 horas, permite obtener una dispersión eficaz de los CNTs en el compuesto. El mismo Esawi junto a colaboradores en el año 2010 mezclaron CNTs en una matriz de aluminio, por medio de un molino de bolas por 30 minutos, consiguiendo que para porcentajes superiores al 2% de CNTs no se obtiene buena dispersión de los nanotubos en la mezcla, y para porcentajes inferiores al 2% hay mejoras en las propiedades mecánicas debido a una dispersión adecuada.

Sin embargo existen limitaciones a la hora de mezclar los nanotubos con otros materiales debido a su naturaleza puede estar química y físicamente enredados, también se presentan en forma de grandes aglomerados con tamaños del orden de varios micrones, donde las fuertes interacciones de Van der Waals entre los nanotubos impiden su completa dispersión.

Por los motivos mencionados la aleación mecánica juega un papel importante. Para explicar un poco este proceso se debe imaginar cantidades específicas de material en forma de polvos, que se constituye en la materia base; cuerpos molidores o bolas especiales que serán los agentes transmisores de la energía para producir la dispersión y consolidar la

aleación. La energía rotacional entregada al recipiente se transmite a los cuerpos moledores que la transforman en energía de impacto que a su vez será entregada por estos al material base, el continuo choque del material con las bolas, bolas-bolas y bolas-recipiente hacen que constantemente el material esté sometido a esfuerzos que produzcan la separación de los aglomerados de partículas, se deben conocer muy bien los parámetros que intervienen en el proceso para evitar que se entregue una alta cantidad de energía que produzca fracturas y modifique la granulometría de los polvos bases . Los conceptos básicos de este y otros procesos asociados se presentarán en los capítulos siguientes profundizando su rigurosidad teórica.

Para el desarrollo del proyecto se trazó como objetivo principal, que la producción de material final aleado debería superar la cantidad obtenida por dispositivos de características similares, ya que su aplicación aunque será a nivel industrial. La estabilidad, viabilidad de construcción con recursos de la región y bajo costo asociado, también se convierten en variables a tener en cuenta durante todo el proceso del diseño.

En los capítulos de esta investigación se plantean el problema a resolver, los conceptos básicos de los procesos pulvimetalúrgicos, las características de los diferentes tipos de dispositivos y procesos para la producción de aleaciones que existen, se hace una breve descripción de cada tipo enunciando ventajas y desventajas, capacidades, etc. Con estos conocimientos, se selecciona el prototipo a construir, se hace un análisis de alternativas y se ajustan los cambios necesarios como son, dimensionar y rediseñar las piezas que cumplan con las exigencias para la construcción del equipo, las disposiciones finales acorde a los requerimientos dados y consideraciones de consecución local de los elementos y sus costos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Para la industria venezolana, cada vez son más importantes las tecnologías de recubrimientos, ya que permiten solucionar problemas de desgaste en piezas, significando un gran avance en el desarrollo industrial y económico del país.

Los recubrimientos de polvos de carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co) son utilizados sobre piezas sometidos a desgaste severo, una de las limitaciones de estos recubrimientos es su baja tenacidad, por lo cual se ha buscado mejorar el comportamiento de estos compuestos reforzándolos con nanotubos de carbono que poseen buenas propiedades eléctricas, térmicas y mecánicas, por lo tanto, al utilizarse en recubrimientos, se ha logrado una mejora importante sus propiedades mecánicas.

En Venezuela el estudio de las propiedades de los CNT y como contribuyen a otros compuestos es relativamente nuevo y en la universidad central de Venezuela, particularmente en la escuela de ingeniería mecánica se están desarrollando estudios e investigaciones sobre las propiedades de estos materiales.

En nuestro país uno de los problemas que se presenta es que no existe la producción a de los recubrimientos a gran escala que permita la obtención de piezas mecánicas a partir de los mismos, ya que hay pocas instituciones que cuentan con la maquinaria necesaria para realizar la mezcla de las aleaciones y las instituciones que cuentan con el equipo solo producen cantidades pequeñas a nivel de laboratorio y presentan limitaciones como la disponibilidad, disposición de operarios, entre otros factores como el tamaño final de las partículas de la aleación que se obtiene, que dificulta su posterior aplicación logrando retrasar las investigaciones, en la industria el tiempo es un recurso muy valioso y es desperdicio de este limitan el desarrollo industrial y tecnológico del país.

La inversión que debe hacerse para adquirir equipos con esta tecnología en el extranjero es alta, debido a problemas de adquisición de divisas en el país. Este trabajo

especial de grado tiene como finalidad realizar una maquina o dispositivo con una baja inversión económica, con piezas que se puedan adquirir en el entorno industrial de Venezuela y que sea competitiva a nivel comercial, para que facilite el proceso e incremente la producción de las aleaciones que superen el nivel de laboratorio para su aplicación en elementos de maquinas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar y fabricar un dispositivo de alta capacidad para la aleación y mezclado de polvos cerámico metálicos, con una capacidad de producción entre 10 a 20 kilogramos de material.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información acerca del proceso de aleación mecánica mediante la consulta de la literatura especializada en el tema.
- Aplicación de la metodología del diseño conceptual (tormenta de ideas, análisis de propuestas, matriz de decisión)
- Seleccionar el tipo de dispositivo a diseñar y construir que cumpla con las especificaciones del objetivo general.
- Realizar la selección de materiales, accesorios y elementos de maquina necesarios para la construcción del equipo.
- Seleccionar la capacidad nominal del equipo tomando en cuenta las variables y limitaciones que intervienen en el proceso.
- Determinar la velocidad de giro optima de trabajo.

- Seleccionar el motor, mecanismo para controlar la velocidad de giro y la generación de movimiento.
- Comprobar el funcionamiento de la maquina.

1.3- MOTIVACIÓN

En la industria el mayor problema que se presenta es el mantenimiento de las piezas, elementos mecánicos, ya que sufren un gran desgaste por las condiciones de su uso, se busca disminuir el desgaste o reparar piezas desgastadas para darle una segunda vida útil y así disminuir los costos de producción.

Los materiales compuestos son una alternativa para suplir tales exigencias y su producción a través de los procesos pulvimetalúrgicos y sus novedosas variaciones hacen que se orienten las investigaciones no solamente hacia su obtención sino hacia su producción.

En los últimos años se han realizado investigaciones acerca de las propiedades mecánicas de los recubrimientos conformado por aleaciones de WC-Co reforzados con nanotubos de carbono. Se ha demostrado que mejoran las propiedades superficiales y esto se traduce en un aumento de la vida útil de las piezas y partes mecánicas.

Los elementos que componen los recubrimientos se encuentran en forma de polvos finos y para poder producirlos estos son mezclados por molinos de jarra para obtener el compuesto. Este proceso se realiza en un Instituto Universitario de Tecnología Dr Federico Rivero Palacios (IUT) ya que es una de las pocas instituciones que cuenta con el equipo necesario para realizar el mezclado, pero se presentan inconvenientes en cuanto a la disposición de la máquina de mezclado, la disposición del operario además de que el proceso dura un tiempo considerable y se produce pequeñas cantidades del compuesto. Por estos motivos señalados, se pretende eliminar la dependencia de este instituto y también optimizar e incrementar la producción de estos compuestos, esto sería de gran beneficio para personas e instituciones que realizan investigaciones sobre los

recubrimientos y sobre todo para las industrias venezolanas donde serán aplicados, además de que sería de gran importancia para el desarrollo tecnológico y económico del país.

1.4 ALCANCES

Con el siguiente proyecto de tesis se diseñó y fabricó un dispositivo de alta capacidad para la producción de aleaciones y mezclas de polvos metálico-cerámicos, cuyo principal uso será la producción de polvos WC-Co reforzados con nanotubos de carbono con una capacidad de 10 kg a 20kg de material, para ello se seleccionó el tipo de maquina más conveniente para la aplicación, se determinó las dimensiones y detalles de los accesorios, también la velocidades optimas de trabajo. Tomando en cuenta los requerimientos del equipo se seleccionó el motor con la capacidad adecuada para el diseño del dispositivo, se seleccionó un mecanismo para variar la velocidad a través de correas para controlar la velocidad de giro. En la investigación se presentaron limitaciones como conseguir los materiales para la construcción del equipo lo cual no solo modifico el diseño inicial previsto sino que además extendió el tiempo contemplado para el desarrollo de este trabajo de grado. El proyecto fue financiado por la empresa PLASMATEC y fue construido y ensamblado en sus instalaciones.

CAPÍTULO II

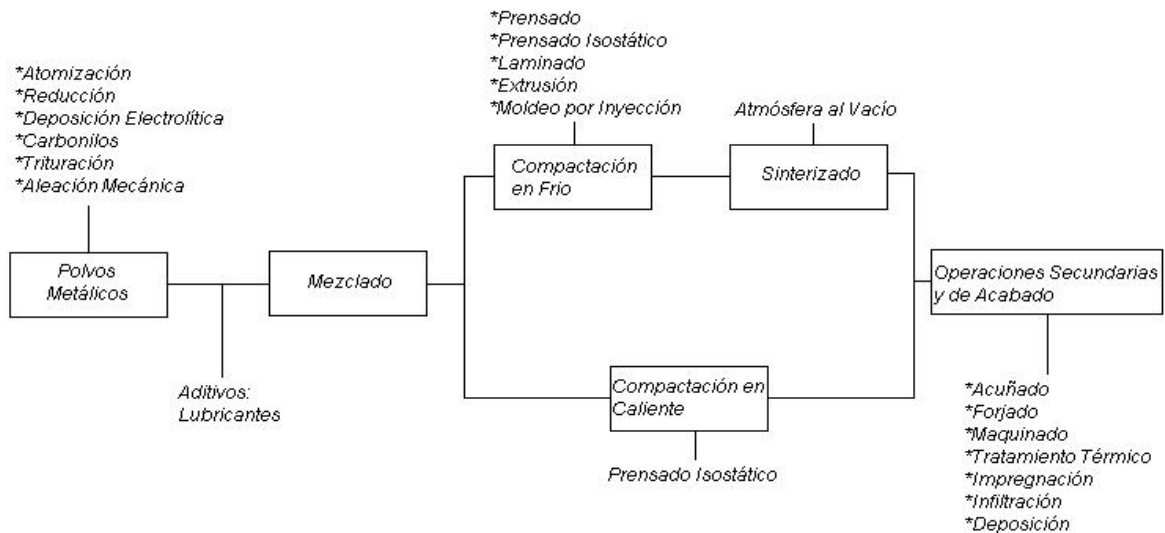
MARCO TEÓRICO

2.1 PULVIMETALURGIA

Históricamente, las aleaciones se preparaban mezclando los materiales fundidos, recientemente, la pulvimetalurgia ha alcanzado gran importancia en la preparación de aleaciones con características especiales. En este proceso, se preparan las aleaciones mezclando los materiales secos en polvo, prensándolos relativamente a alta presión y calentándolos después a temperaturas justo por debajo de sus puntos de fusión, este tipo de material obtenido es muy utilizado para la fabricación de piezas pequeñas en gran cantidad (Groover, 2007).

Esta práctica aparece por necesidad tecnológica, además es un proceso económico, ya que existe diversidad de procesos y equipos, para reducir los materiales a polvos, que resultan ser de fácil aplicación y fabricación. Los procesos y operaciones comunes a la producción de productos utilizando la tecnología de la metalurgia de polvos se muestran en la figura 1

Figura 1: Esquema del proceso de metalurgia de polvos



Fuente: Revista latinoamericana de metalurgia y materiales. v.26 n.1-2 Caracas ene 2006 (versión online). disponible en internet bajo dominio: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0255-69522006000100010&script=sci_arttext

2.2 PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE POLVOS METÁLICOS.

El tamaño adecuado de las partículas de polvo es del orden de uno a varios cientos de micrómetros, la mayoría de los polvos se fabrican por fragmentación de un metal fundido, como ocurre en la atomización, en la que colisionan corrientes del metal con chorros de agua o gas estrechos.

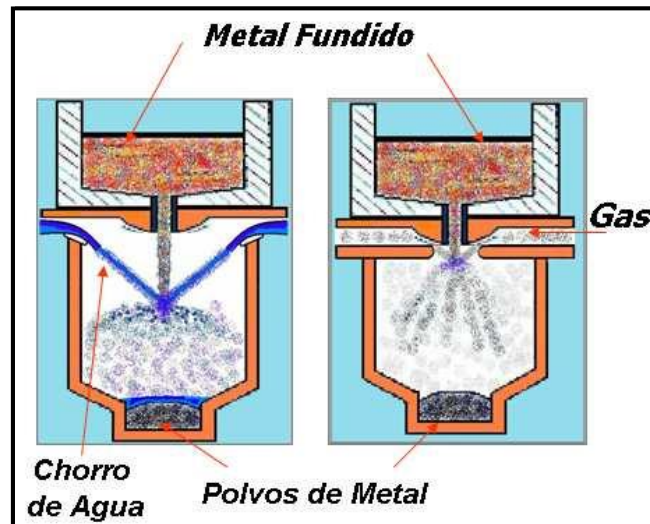
Otros polvos se obtienen moliendo o triturando de alguna forma trozos de metal. También pueden producirse químicamente, reduciendo a metal óxidos en polvo o precipitando partículas metálicas en una solución acuosa (Grueso y Herrera, 2005).

2.2.1 Por Atomización

En la Figura 2 se muestra el proceso, el sistema consta de un compartimiento en la parte superior donde el metal fundido es depositado, por medio de un ducto pasa a

una segunda cámara donde se aprecia que se inyecta por los costados un fluido, generalmente agua ó un gas noble, que causan un choque térmico bastante elevado entre fluido y metal originando un rápido enfriamiento y la formación de polvos metálicos que son depositados en la parte inferior del tazón.

Figura 2. Atomización por Agua y Gas.



Fuente: LPW TECHNOLOGY; pagina web con dominio: <http://www.lpwtechnology.com/informacion-tecnica/produccion-de-polvos/?lang=es>

2.2.2 Reducción Química

Este proceso es el más utilizado para la producción de polvo de hierro. La materia prima seleccionada es aplastada, mezclada con carbón y pasada por un horno continuo en donde reacciona. Básicamente consiste en someter el material a la acción de sucesivos ataques químicos, generando mecanismos de oxidación y reducción. Después se aplasta nuevamente, se separan los materiales no metálicos y se tamiza para producir el polvo.

2.2.3 Electrolisis

Escogiendo las condiciones apropiadas posición y fuerza del electrolito, corriente, densidad, temperatura, etc., muchos metales pueden convertirse en polvos metálicos. La electrólisis es la producción de una reacción redox no espontánea, mediante el paso de una corriente eléctrica. Es por lo tanto el proceso inverso al que ocurre en una pila eléctrica, y se lleva a cabo en un contenedor llamado cuba electrolítica.

Este proceso puede requerir de otros procesos como secado, aleado, lavado, etc., para lograr las propiedades deseadas. Se usa por lo general para producir polvo de Cobre, pero también se puede utilizar para la producción de polvo de Cromo y Manganeso. Dos de las mayores cualidades de este proceso son la alta pureza y la alta densidad alcanzada en los polvos.

2.3 MEZCLADO Y COMBINACION

Para lograr buenos resultados en la compactación y en el sinterizado, los polvos metálicos necesitan homogeneizarse perfectamente antes del proceso. Para ello, se deben mezclar y combinar los polvos. El mezclado se refiere a la mezcla de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partículas, mientras que la combinación se refiere a la mezcla de polvos con diferente composición química. El mezclado tiene por objetivo:

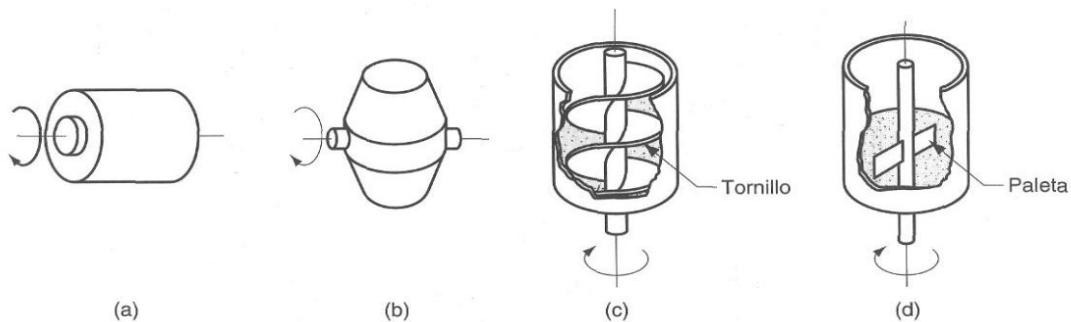
- Obtener uniformidad, ya que los polvos fabricados por los distintos procesos tienen diferentes tamaños y formas. La mezcla ideal es aquella en la que todas las partículas de cada material se distribuyen uniformemente.
- Poder introducir polvos de distintos materiales, incluso metales, para impartir propiedades y características físicas y mecánicas especiales al producto. Existen dos categorías bien definidas, tales como aglutinantes y desfloculantes. Los aglutinantes tienen como función lograr una resistencia adecuada en las partes prensadas, pero

no sinterizadas. Los desfloculantes inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar sus características de flujo durante la alimentación.

- Poder mezclar lubricantes con los polvos, para mejorar sus características de flujo. Se obtiene una menor fricción entre las partículas metálicas, mejor flujo de los metales en polvo hacia los moldes, y una mayor vida de las matrices. Los lubricantes que se usan con frecuencia son ácido esteárico o estearato de zinc, en la proporción de 0,25 a 5% en peso. También para reducir la fricción se agrega también Aluminio, aunque en pequeñas cantidades.

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos como se ven en la figura 3, utilizando tambores rotatorios, o fijos, pero con paletas mezcladoras también en molinos de bolas por medio de la aleación mecánica. El mezclado de los polvos se debe hacer bajo condiciones controladas, para evitar contaminaciones o deterioro. El deterioro se debe a mezclado excesivo, que puede modificar la forma de las partículas y endurecerlas por trabajo, dificultando así la siguiente operación de compactación. Los polvos se pueden mezclar en aire, en atmósferas inertes (para evitar la oxidación) o en líquidos (lubricantes). (Groover, 2005)

Figura 3. Varios dispositivos de mezclado y combinación: (a) Tambor rotatorio, (b) Doble cono rotatorio, (c) Mezclador de tornillo y (d) Mezclador de paletas.



Fuente: Mercadotecnia. Artículo en línea publicado el 29 de junio de 2010 por Alfredo Jesús Paredes .
pagina web con dominio: http://mecnotecnia.blogspot.com/2010_06_01_archive.html

2.4 ALEADO MECÁNICO

La molienda por bolas fue utilizada por J. S. Benjamín en 1966, intentando mejorar las características mecánicas de las superaleaciones base níquel mediante el uso de la molienda mecánica de alta energía, en el laboratorio de Investigaciones Paul D. Merica (INCO). Como proceso fue conocido 40 años antes desde el trabajo de Hoyt , quien reporto un recubrimiento de WC con Co por molienda de bolas. Se considera que la primera publicación relacionada a esta nueva técnica apareció en 1970, en donde primeramente se conoció como molienda/mezclado y posteriormente, ha este proceso de estado sólido, Benjamín le llamó aleado mecánico (AM). A partir de esta publicación este proceso, ha sido usado para la síntesis de una gran variedad de materiales, incluyendo aleaciones de Cu, Al, Mg, superconductores, cerámicos, etc. La mayoría de los trabajos antes de los 80's se concentraron en la producción de superaleaciones ODS (Ni y Fe) y aleaciones de Al. (Ayala, 2006).

El aleado mecánico (AM) es una técnica de procesamiento de polvos simple, elegante, y útil; que se lleva a cabo en estado sólido y que implica una repetida soldadura, fractura, y resoldadura de las partículas del polvo en un molino de bolas de baja o alta energía. Sin embargo, existen dos términos que se utilizan comúnmente en la literatura para referirse a esta técnica; en primer lugar, el aleado mecánico (AM) describe el proceso cuando las mezclas de polvos (de diversos metales o de aleaciones/compuestos), se someten juntas al proceso de molienda, y la transferencia del material está implicada en este proceso para obtener una aleación homogénea, mediante una reacción química entre los diversos polvos.

Y un segundo término es la molienda mecánica (MM), que consiste de una molienda de composición (a menudo estequiométrica) uniformemente pulverizada, por ejemplo, metales puros, intermetálicos, o polvos prealeados, donde la transferencia del material no se requiere para la homogeneización, ya que únicamente se produce una modificación de textura y/o la estructura de un material (ninguna reacción química está implicada en el proceso). Por otro lado, se considera que la MM de polvos reduce la oxidación de los polvos constitutivos, relacionado con la disminución del

tiempo del proceso. Por lo que también debe ser observado que el AM es un término genérico, que algunos investigadores utilizan para incluir la aleación mecánica y molienda mecánica, desordenamiento, reducción de tamaño de partícula.

Dentro de las características del AM se encuentran, que los polvos serán pulverizados, los cuales generalmente son colocados en pequeños contenedores en donde se introducen también bolas o balines. La transmisión generada por el motor del molino, con un alto número de revoluciones en el caso de un molino de alta energía, permite la vibración del mismo que se trasmite hacia dentro del contenedor en donde se da la agitación regularmente aleatoria de las bolas, produciendo impactos continuos sobre el material a moler. Con el tiempo del proceso, se conseguirá una actividad repetida y múltiple la cual finalmente generará, el proceso de difusión forzada deseado para la formación de una variedad de materiales que actualmente pueden ser preparados por esta técnica. También es importante mencionar dos fenómenos opuestos que son inducidos por el proceso de molienda: en uno de ellos, las partículas parten como resultado de la alta presión creada, por la tensión interna aplicada a los granos y por otra parte las partículas tienden a aglomerarse debido a la alta reactividad de sus superficies para reducir al mínimo su energía superficial.(Reinteria, 2008).

2.4.1 Procesamiento de materiales avanzados por molienda o aleado mecánico.

El procesamiento de materiales en condiciones fuera de equilibrio, ha atraído recientemente a un numeroso grupo de científicos, debido a la posibilidad de producir nuevos materiales y del mejoramiento de los ya existentes que son fabricados por técnicas convencionales. Actualmente el AM, es una técnica de procesamiento de polvos en seco que se ha utilizado para producir fases de equilibrio y metaestables de muchos materiales de interés comercial y científico. El AM, es una técnica versátil y simple que al mismo tiempo es económicamente viable con ventajas técnicas importantes. Una de sus grandes ventajas es la posibilidad de evaluar nuevas aleaciones, por ejemplo, aleaciones de elementos que normalmente son inmiscibles, esto se debe a que el AM, es

completamente una técnica de procesamiento en estado sólido y por lo tanto las limitaciones impuestas por los diagramas de fase no aplican aquí. (Ayala, 2006).

2.4.2 Materiales producidos por AM/MM.

Generalmente los materiales aleados mecánicamente presentan excelentes propiedades mecánicas, por lo que el aleado mecánico se puede usar para la síntesis de una gran variedad de materiales incluyendo cerámicos, intermetálicos y compuestos. Además permite resolver muchas de las limitaciones de técnicas de aleación convencional, como la aleación de dos metales con diferentes puntos de fusión. También es una alternativa para otros métodos de procesamiento tal como la solidificación rápida y deposición física de vapor. Por lo que el aleado mecánico es considerado como una técnica muy útil para la obtención de materiales novedosos como: aleaciones ODS (de refuerzos de óxidos dispersos), materiales amorfos, soluciones sólidas extensas, compuestos intermetálicos, materiales nanoestructurados, materiales compuestos, cuasicristales, etc. (Reinteria, 2008).

El desarrollo de este proceso ha llegado a la obtención de materiales convencionales como las aleaciones base hierro o los aceros ferríticos endurecidos por dispersión, también ha hecho posible de aleaciones de titanio en base aluminio como Al_3Ti , y base níquel que destacan NiAl y Ni_3Al . El proceso de aleación mecánica también ha logrado obtener materiales en base cobalto, expuestas a condiciones de fuerte desgaste, las de base magnesio, hasta las aleaciones base niobio.

Otra de las aplicaciones importantes de este proceso es la posibilidad de obtención de materiales compuesto de matriz metálica. Ofrece la posibilidad de obtener propiedades muy superiores a las alcanzadas por otros métodos y elimina uno de los mayores problemas asociados a su producción como es la formación de segregaciones y aglomerados. La posibilidad de obtener un material compuesto constituido desde el principio por polvos de matriz metálica reforzada por partículas cerámicas, finalmente dispersas en su interior,

permite alcanzar un material final de propiedades muy por encima de las esperadas (Elisa Ruiz 2000).

2.4.3 El proceso de Aleado Mecánico.

El proceso de AM comienza con la carga de la mezcla de polvos en un contenedor, junto con los medios de molienda. En el AM se deben considerar algunos componentes importantes para el desarrollo del proceso como, las materias primas, el molino o tipo de molino, y las variables del proceso; las cuales serán descritas brevemente a continuación.

2.4.3.1 Materias Primas.

Generalmente las materias primas usadas para el AM o MM son los polvos, los cuales son comercialmente puros y están disponibles en diferentes tamaños de partícula que se encuentran en el rango de 1-200 μm . Se considera que el tamaño de partícula de los polvos no es muy crítico, ya que este disminuye exponencialmente con el tiempo alcanzando un valor pequeño de algunas micras solamente después de algunos minutos de molienda. También es importante mencionar que los polvos caen en varias categorías como; metales puros, aleaciones, polvos prealeados, compuestos de materiales refractarios, etc.

2.4.3.2 Tipos de Molinos.

Existen diferentes molinos de bolas convencionales que realizan la molienda llamada de baja energía, en donde el molino se presenta de manera horizontal y es rotado a través de rodillos, estos tipos de molinos son ampliamente utilizados de manera industrial, no solo en la fabricación de materiales sino también en el procesamiento de minerales. También existen molinos, llamados atricionadores en donde un eje en posición axial agita bolas y material fuera de secuencia de rotación del contenedor del molino. Por esta característica este tipo de molinos presentan mayores energías de coalición que los primeros y también son utilizados industrialmente. A nivel de

laboratorio, actualmente son utilizados los molinos de alta energía, debido a que los tiempos de molienda experimentales se reducen importantemente. Entre estos, se encuentran el molino planetario y el vibratorio, este último efectivamente presenta un movimiento al azar en las tres direcciones (x, y, z). Los diferentes equipos de molienda de alta energía experimentales, principalmente difieren en su capacidad, eficiencia de molienda y disposición o arreglo especial para realizar la molienda. A continuación se da una descripción de los diversos tipos de molinos disponibles para el aleado mecánico.

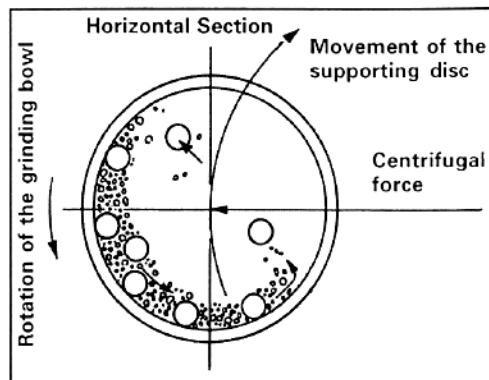
2.4.3.2.1 Molino Vibratorio.

Estos tipos de molinos muelen cerca de 4-20 gr., de polvo a la vez, y son comúnmente utilizados en laboratorios de investigación. Los contenedores son colocados en los brazos del molino, los cuales se mueven hacia adelante y hacia atrás varias miles de veces al minuto para generar la energía de la molienda. Cada oscilación del contenedor ocasiona que las bolas golpeen o choquen contra la muestra y el extremo del vial produciendo la molienda y la mezcla de la misma. Además este tipo de molino tiene una velocidad de 1800 RPM que genera el movimiento de los brazos o soportes por lo que las velocidades del movimiento de las bolas es alto, en el orden de 5 m/s, y por consecuencia la fuerza de impacto de las bolas es grande. Por lo tanto estos molinos son considerados como de alta energía.

2.4.3.2.2 Molino Planetario.

Otro tipo común, es el molino planetario de bolas (diseñado para pulverizar) en el cual algunos cientos de gramos de polvo pueden ser molidos a la vez (figura 4). Debe su nombre al movimiento similar de los planetas con el movimiento de los contenedores. Está constituido de un disco rotatorio y un mecanismo especial de manejo que hace rotar al vial alrededor de su propio eje. La fuerza centrífuga producida por los viales que giran alrededor de su propio eje y la producida por el disco rotatorio actúa sobre el contenido del vial, que contiene al material y las bolas para llevar a cabo el proceso de molienda.

Figura 4 Molino planetario.

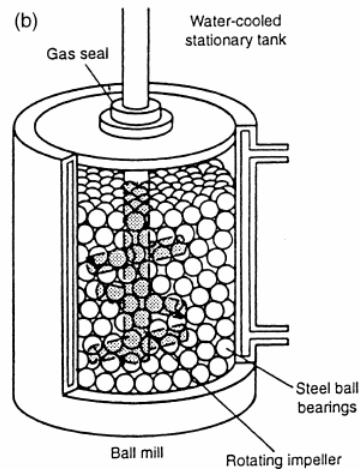


Fuente: LAVAL LAB INC.; pagina web con dominio: <http://lavallab.com/es/products/molinos/micro-molino-planetario/>

2.4.3.2.3 Molino Atritor.

Los molinos Atritor, consisten de un tambor vertical con una serie de propulsores que se encuentran dentro de este. En donde estos están fijos y colocados progresivamente y perpendicularmente el uno al otro, por lo que debido a los propulsores se energizan las bolas, causando la reducción de tamaño del polvo debido al impacto entre las bolas, entre las bolas y la pared del contenedor y entre las bolas, el eje del mezclador, y los propulsores. En donde los propulsores se hacen rotar por medio de un motor de gran energía y velocidad para alternadamente agitar las bolas en el interior del tambor y producir la molienda (figura 5).

Figura 5 Molino Atritor



Fuente: ALNICOLSA del Peru S.A.C.; pagina web con dominio: <http://taninos.tripod.com/molinobolas.htm>

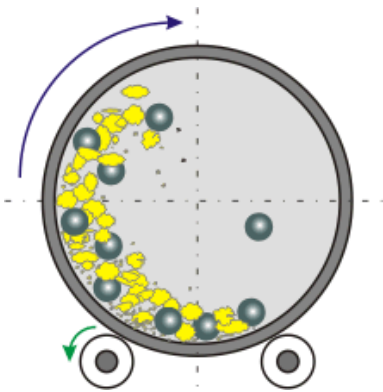
La capacidad de estos molinos es grande de cerca de 0.5 a 40 kg de polvos, los cuales pueden ser molidos a la vez; mientras que la velocidad del medio de molienda es mucho más baja cerca de 0.5 m/s.

2.4.3.2.4 Molinos rotatorios.

Los molinos rotatorios son básicamente de tres tipos: barras, bolas y autógenos. Estructuralmente cada tipo de molinos consiste en un casco horizontal cilíndrico, provisto con forros de desgaste renovables y una carga de medio moledor. El tambor puede rotar en sus ejes por los muñones fijados hacia un extremo. El diámetro de los molinos determina la presión que puede ser ejercido por el medio moledor sobre las partículas, en general a mayor tamaño de alimentación se requiere mayor diámetro del molino, la longitud del molino, en conjunción con el diámetro, determina el volumen por tanto la capacidad del molino.

Se pueden distinguir tres tipos de movimiento de los medios de molienda en un molino rotatorio: a) rotación alrededor de su propio eje, b) caída en cascada, donde los medios bajan rodando por la superficie de los otros cuerpos y c) caída en catarata que corresponde a la caída libre de los medios de molienda sobre el “pie” de la carga como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Molino rotatorio



Fuente: Álvarez Gerardo. Factibilidad de aplicación bluetooth a un sensor de Desgaste, aprovechando la ventaja de detección de posición. Artículo online publicado en 2005.; pagina web con dominio: http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo323/2s06/projects/GerardoAlvarez/proyecto_final.html

2.4.3.3 Selección del tipo de molino

Es muy importante la selección del tipo de molino dependiendo de lo que se requiera hacer. Se han desarrollado nuevos diseños de molinos en los últimos años para propósitos especializados, como molinos de barras, molinos vibratorios de campo, etc. Por otra parte, se sabe que los molinos vibratorios, son los que tienen la mayor eficiencia ya que se ha divulgado que 20 minutos de molienda en un molino vibratorio son equivalentes a 20 h de molienda en un molino de baja energía. En consecuencia se ha estimado que un proceso que tarda solo algunos minutos por ejemplo en un vibratorio, puede tardar horas en un atricionador y algunos días en un molino rotatorio.

2.4.3.4 Variables del Proceso.

El aleado mecánico es un proceso complejo que implica la optimización de un número de variables para producir la fase y/o la microestructura deseada del producto. Entre los parámetros más importantes que tienen efecto en la constitución final del polvo se encuentran: tipo de molino, contenedor de molienda, velocidad de molienda, tiempo de molienda, así como tipo, tamaño y distribución de tamaño del medio de molienda; entre otras variables se encuentran relación peso de bola a peso de muestra, capacidad de carga del contenedor, atmósfera de molienda, agente de control del proceso y la temperatura de molienda. Aunque estas variables no son totalmente independientes; por ejemplo, el tiempo óptimo de molienda depende del tipo de molino, del tamaño del medio de molienda, de la temperatura de la molienda, de la relación de peso bolas a peso muestra, etc. Por lo que a continuación se describe el efecto de cada una de estas variables durante la etapa del proceso de molienda de los polvos.

2.4.3.4.1 Tipo de Molino.

Como ya se ha mencionado anteriormente hay un número de diversos tipos de molinos para llevar a cabo el AM. Estos molinos se diferencian por su capacidad, velocidad de operación, y de su capacidad de controlar la operación variando la temperatura de molienda y el grado de reducir al mínimo la contaminación de los polvos. En donde dependiendo del tipo de polvo, cantidad del polvo, y la constitución final requerida, se puede elegir un molino conveniente para llevar a cabo el AM. Sin embargo, los más comúnmente utilizados son: los molinos vibratorios que se utilizan para propósitos de investigación. Mientras que los molinos planetarios de bolas se utilizan para producir cantidades grandes de polvos molidos; y finalmente los molinos especialmente diseñados se utilizan para usos específicos.

2.4.3.4.2 Contenedor de Molienda.

Es muy importante el material usado para el contenedor de molienda debido al impacto del medio de molienda con las paredes internas de este mismo, ocasionando que un poco de material sea desprendido produciendo una contaminación que altere químicamente el polvo. Si el material del contenedor de molienda es diferente al del polvo, es muy probable que los polvos se contaminen. Por otra parte, si los dos materiales son iguales, entonces la química puede ser alterada únicamente si no se toman las precauciones apropiadas de una cantidad adicional de algún elemento incorporado en el material (polvo). Algunos de los materiales usados son: acero endurecido, acero para herramienta, acero al cromo endurecido, acero templado, acero inoxidable, WC, y el acero de cojinete los cuales son los tipos más comunes de materiales usados para la fabricación de los contenedores de molienda. Sin embargo existen algunos otros materiales específicos que se utilizan para propósitos especiales.

2.4.3.4.3 Velocidad de Molienda.

Es fácil pensar que mientras más rápidamente gire o rote el molino más alto será la cantidad de energía suministrada a los polvos. Pero, dependiendo del diseño del molino hay ciertas limitaciones en la velocidad máxima que podría ser empleada. Por ejemplo, para un molino de bolas bola convencional al aumenta la velocidad de rotación las bolas son fijadas a las paredes internas del contenedor por la fuerza centrífuga y no caen para ejercer o producir la fuerza del impacto. Por lo tanto, la velocidad máxima debe ser justa debajo de este valor crítico de modo que las bolas caigan por debajo de la altura máxima para producir la energía de la colisión. Otra limitación a la velocidad máxima de las altas velocidades (o intensidad de molienda), es la temperatura del contenedor que puede alcanzar un valor alto. Esto puede ser ventajoso, en algunos casos donde es requerida la difusión para promover la homogeneización y/o la aleación de los polvos. Pero, en algunos casos, este aumento de temperatura puede ser una desventaja. Para los molinos de bolas rotatorios se ha desarrollado una expresión para determinar la velocidad crítica del molino.

2.4.3.4.4 Tiempo de Molienda.

Este es el parámetro más importante del proceso de molienda. Los tiempos requeridos varían dependiendo del tipo de molino usado, de la intensidad de molienda, de la relación peso bolas a peso muestra, y de la temperatura de molienda. Estos tiempos tienen que ser determinados para cada combinación de los parámetros anteriormente mencionados y para el sistema particular de polvo. Pero, debe ser observado que el aumento en la cantidad de la contaminación y la formación de algunas fases indeseables pueden ser formados si el polvo es molido por periodos de tiempos largos o prolongados. Por lo que se debe considerar el tiempo en el cual el polvo se muele hasta el grado de reducción deseada evitando un periodo de molienda más largo.

2.4.3.4.5 Medios de Molienda.

Generalmente estos son producidos de materiales como: acero endurecido, acero para herramienta, acero al cromo endurecido, acero templado, acero inoxidable, WC, y acero de cojinete, ya que son los tipos más comunes de materiales usados para la fabricación de los medios de molienda (bolas). La densidad del medio de molienda debe ser bastante alta de modo que las bolas creen bastante fuerza durante el impacto con el polvo. Sin embargo, como en el caso del contenedor de molienda, algunos materiales especiales se utilizan para la fabricación de los medios de molienda. Aunque siempre es deseable o recomendable que sean tanto el contenedor como los medios de molienda del mismo material que el polvo que se pretende moler para evitar una posible contaminación. Por otro lado, el tamaño del medio de molienda también tiene una influencia considerable en la eficacia de la molienda. Generalmente se considera que un tamaño grande (y alta densidad) del medio de molienda es más útil, puesto que el peso más grande de las bolas transferirá más energía en el impacto a las partículas del polvo. Así, la constitución final del polvo depende del tamaño del medio de molienda usado. Por lo que condiciones de molienda "suaves" (tamaños pequeños de las bolas, energías más bajas, y relaciones más bajas de peso bola a peso muestra) favorecen la amorfización o

la formación de una fase metaestable. Se ha predicho que la más alta energía de las colisiones se obtiene si los medios de molienda utilizados son de diversos diámetros.

2.4.3.4.6 Relación peso bolas a peso muestra.

La relación peso bolas a peso muestra (BPR), llamada a veces como relación de carga (CR), es una variable importante en el proceso de molienda. Esta ha sido variada desde un valor de 1:1 hasta 220:1, y se determinó que la relación 10:1 es la más utilizada para la molienda de polvos en molinos de capacidades pequeñas. Pero, sin embargo cuando la molienda se realiza en un molino de capacidad grande, como un atricionador, se usa una BPR más alta de hasta 50:1 o 100:1. La BPR tiene un efecto significativo en el tiempo requerido para la molienda ya que mientras más alto es la BPR más corto es el tiempo requerido para la formación de una aleación, compuesto, o simplemente la reducción del tamaño del material. Por otro lado, se considera que una alta BPR genera un aumento en la proporción del peso de las bolas, así como el aumento del número de colisiones por unidad de tiempo y por consecuencia una mayor transferencia de energía a las partículas de polvo. Sin embargo, también es posible que debido al aumento de energía más calor se está generando, y éste podría también cambiar la constitución del polvo.

2.4.3.4.7 Llenado del Vial.

La aleación entre las partículas del polvo ocurre debido a las fuerzas del impacto ejercidas en ellas, por lo que es necesario que haya bastante espacio para que las bolas y las partículas del polvo se muevan alrededor y libremente en el contenedor donde se lleva a cabo la molienda. Por lo tanto, la capacidad de la carga de polvos en el contenedor y de las bolas es importante. Si la cantidad de las bolas y del polvo es muy pequeña, entonces la cantidad de la producción también es muy pequeña. Por otra parte, si la cantidad es grande entonces no hay bastante espacio para que las bolas se

muevan alrededor y así la energía del impacto es menor. Debido a esto se debe tener mucho cuidado para no sobre llenar el contenedor, el cual debe ser llenado aproximadamente en un 50 % del espacio de este y el resto se deja vacío.

2.4.3.4.8 Agentes de Control del Proceso.

Las partículas del polvo son soldadas una con otra en frío, especialmente si son dúctiles, debido a la deformación plástica que experimentan durante la molienda. Pero sin embargo, la aleación verdadera entre las partículas del polvo ocurre solamente cuando se mantiene el equilibrio entre la soldadura en frío y la fractura de las partículas. Un agente de control de proceso (PCA) (también llamado como lubricante o surfactante) se agrega a la mezcla del polvo durante la molienda para reducir el efecto de la soldadura en frío. Los PCA pueden ser sólidos, líquidos, o gaseosos. Los PCA se fijan por adsorción en la superficie de las partículas del polvo y reducen al mínimo la soldadura en frío entre las partículas del polvo, y de tal manera inhiben la aglomeración.

Una amplia gama de PCAs se han utilizado en la práctica en una proporción cerca de 1-5 % en peso de la carga total del polvo. Los más importantes PCAs incluyen, el ácido esteárico, el hexano, el metanol, y el etanol. Además, existen otros PCAs. La mayoría de estos compuestos se descomponen durante la molienda.

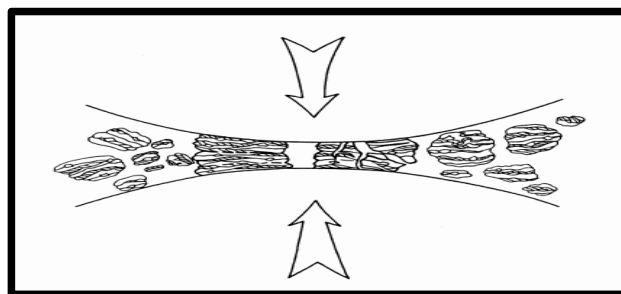
La naturaleza y la cantidad del PCA usado, así como el tipo de polvo molido determinaran el tamaño, forma, y la pureza final de las partículas del polvo. Por lo que se considera que el uso de un PCA durante la molienda depende de la naturaleza del polvo que va hacer usado y de la pureza del producto final deseado. Se considera que una forma de determinar la eficacia del PCA es determinando la producción del polvo después del AM. Si la producción del polvo es alta, el PCA es eficaz. Mientras que, sí la producción del polvo es baja, entonces la cantidad de PCA usado no es suficiente, o no es probablemente el PCA requerido. Debe observarse que no existen PCA universales; ya que se considera que la cantidad del PCA depende de: a) las características de la soldadura en frío de las partículas del polvo, b) del producto químico y de la estabilidad

térmica del PCA, y c) de la cantidad del polvo y del medio de molienda usado. El tamaño de partícula del polvo tiende a aumentar si la proporción entre el peso del PCA y el polvo está debajo de un valor crítico, mientras que sobre este valor el tamaño de partícula tiende a disminuir.

2.4.4 Mecanismos del Aleado y Molienda Mecánica.

Durante la molienda las partículas del polvo se aplanan, se soldan en frío, se fracturan y se soldan nuevamente. Siempre que choquen dos bolas de acero (o de otros materiales), una cierta cantidad de polvo es atrapado entre ellas; como se muestra en la figura 7. La fuerza del impacto de la deformación plástica de las partículas de polvo produce el trabajo de endurecimiento y fractura. Las nuevas superficies creadas permiten a las partículas ser soldadas produciendo un aumento en el tamaño de la partícula. Puesto que en los primeros tiempos de molienda, las partículas son suaves (si estamos utilizando la combinación de material dúctil-dúctil o dúctil-frágil), su tendencia a soldar y formar partículas más grandes es más alta.

Figura 7. Colisión entre bola-polvo-bola, de la mezcla de polvos durante el aleado mecánico.



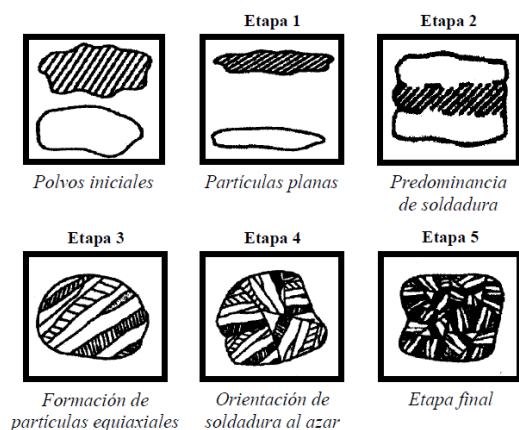
Fuente: Slide Player; pagina web con dominio: <http://slideplayer.es/slide/85105/>

El aleado mecánico es posible realizarse bajo tres diferentes combinaciones de metales

y/o aleaciones: a) dúctil-dúctil, b) dúctil-frágil y frágil-frágil. Desde su invención, una gran cantidad de investigadores han tratado de entender un mecanismo que sea capaz de optimizar y controlar el proceso de molienda.

Para realizar o presentar una descripción completa sobre la morfología de la partícula y evolución microestructural, Benjamín y Volin utilizaron un sistema dúctil/dúctil de aleaciones Fe-Cr, durante el proceso de AM/MM. En donde ellos dividieron el proceso en cinco intervalos o etapas de tiempo, tal como se representa esquemáticamente en la figura 8.

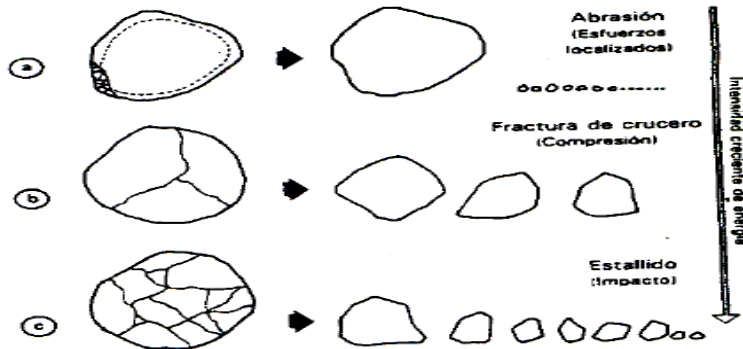
Figura 8 esquemas del proceso AM



Fuente: Revista del instituto de investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas (versión online).volumen 4 N 07, Enero -Junio 2001. disponible en internet bajo dominio: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v04_n7/fig_2_metalogr.htm

En el mecanismo de AM Existen tres tipos de fractura (impacto, compresión y fricción) cada uno se presenta en mayor medida a medida que varía la intensidad de la conminución. En la figura 9 se muestra como varía el tipo de fractura en comparación con la intensidad creciente de energía.

Figura 9 fractura de partículas según la intensidad de energía



Fuente: Revista del instituto de investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas (versión online).volumen 4 N 07, Enero -Junio 2001. disponible en internet bajo dominio: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v04_n7/fig_2_metalogr.htm

2.4.5 Teoría de conminución.

La teoría de la conminución se ocupa de la relación entre la energía consumida y del tamaño del producto obtenido de un tamaño dado de alimentación. Varias teorías han sido expuestas, ninguna de ellas es completamente satisfactoria. El problema más grande se debe al hecho de que la mayoría de la energía suministrada a una máquina de molienda es absorbido por la maquina en sí misma y solamente una pequeña fracción de la energía total es usada para la rotura del material. Se espera que haya una relación entre la energía requerida para quebrar el material y la nueva superficie producida en el proceso, pero esta relación puede ser solamente probada si la energía producida en crear nueva superficie puede ser medida separadamente. En los molinos de bolas por ejemplo, ha sido demostrado que menos del 1 % de la energía total suministrada es usada para la reducción de tamaño. Otro factor es que un material dúctil consumirá energía en el cambio de la forma sin producir ningún resultado. Todas las teorías de conminución asumen que el material es rompible.

Bond postulo una ley empírica que se denomino la “Tercera Ley de la Conminución”. Siendo el enunciado:

“La energía consumida para reducir el tamaño a 80% de un material es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tamaño 80%. Siendo este ultimo igual a la abertura del volumen en micrones que deja pasar el 80% en peso de la partícula”.

Es decir:

$$E_B = K_B \left[\left(\frac{1}{\sqrt{dp}} \right) - \left(\frac{1}{\sqrt{df}} \right) \right]$$

Ec.1 Tercera Ley de la Conminucion

F. Bond, definió el parámetro KB en función del Work Index, Wi (índice de trabajo del material), que corresponda al trabajo total (expresado en Kwh/ton corta) necesario para reducir una tonelada corta de material desde un tamaño teóricamente infinito hasta partículas que en un 80% sean inferiores a 100 micrones

Entonces:

$$Wi = K_B \left[\left(\frac{1}{100^{1/2}} \right) - \left(\frac{1}{\alpha^{1/2}} \right) \right] = \frac{K_B}{10}$$

Ec.2 de la constante de Bond K_B en función del Índice de trabajo

De donde $K_B = 10 \times Wi$

$$W = Wi \left[\left(\frac{1}{P80^{1/2}} \right) - \left(\frac{1}{F80^{1/2}} \right) \right] \quad \text{Ec.}$$

P80 = dp = Tamaño 80% pasante del producto (um)

F80 = df = Tamaño 80% pasante la alimentacion (um)

Wi = Indice de trabajo del material (Kwh/ton corta).

W = E_B = Consumo de energía especifica (Kwh/ton corta), para reducir un material desde un tamaño inicial F80 a un tamaño final P80.

El Work índice es el parámetro de la conminución que expresa la resistencia del material a ser molido; numéricamente son los kilowatt-hora. Los valores de Work Index, pueden ser usados para calcular el efecto de las variables de operación como: velocidad del molino, tamaño del medio molidor, tipo de los forros etc. En la tabla 1 se presenta los valores de Wi para algunos minerales.

| MATERIAL | Work índice | MATERIAL | Work index |
|--------------|-------------|----------|------------|
| Barita | 4,73 | Granito | 15,13 |
| Bauxita | 8.78 | Grafito | 43,56 |
| Carbón | 13.00 | Caliza | 12,74 |
| Dolomita | 11,27 | Cuarcita | 9,58 |
| Esmeril | 56,70 | Cuarzo | 13,57 |
| Ferrosilicon | 10,01 | | |

Tabla1 selección de índices de trabajo de bond

2.5 TERMOROCIADO

Los recubrimientos termo rociados son comúnmente aplicados para ofrecer resistencia principalmente frente al desgaste y la corrosión, tanto a temperaturas ambientes como a temperaturas elevadas, así como también para restablecer las dimensiones de piezas desgastadas.

El termo rociado es un proceso que usa la energía química (combustión) o eléctrica (plasma o arco) para calentar y acelerar partículas (metal, cerámica, cermets, intermetálicos y polímeros) con una antorcha o pistola a velocidades que oscilan entre 50 y 1000 m/s y proyectarlas contra las superficies a ser recubiertas (Gedler 2003).

En el proceso de termorociado existen variables que influyen en la calidad del recubrimiento; podemos señalar como variables que afectan el proceso: el calentamiento y la proyección del material e impacto sobre el sustrato y el material de alimentación al cual se presentara más atención ya que es el resultado final de este proyecto.

El material de alimentación es el que será rociado sobre el sustrato previamente preparado para formar el recubrimiento. Puede presentarse en forma de polvo, el cual puede ser alimentado a través de una tolva, en forma de varilla, cordón o alambre por medio de rodillos

Los polvos de alimentación pueden tener tamaños similares pero diferente morfología, lo que influye significativamente en las características del rociado térmico, debido a esto con el tamaño de los polvos también debe especificarse la morfología de ellos para obtener un recubrimiento de buena calidad. Los polvos obtenidos por procesos de atomización de un gas tienden a ser esféricos, mientras que los atomizados con agua y obtenidos por molienda son angulares. Los polvos obtenidos por aglomeración tienden a ser más porosos.

El tamaño de grano del polvo es un parámetro importante, que afecta la calidad del recubrimiento. La mayoría de los polvos utilizados para rociado térmico miden entre 5 y 80 μm . Para partículas muy grandes, puede que no se fundan, que se desvíen del eje central del chorro de gas o que reboten del sustrato, mientras que para partículas muy pequeñas se pueden evaporar en la llama (Blanco 2014).

2.6 CARBURO DE WOLFRAMIO

El carburo de wolframio o carburo tungsteno es comercialmente uno de los polvos metálicos más antiguos y exitosos. Es un material de dos fases catalogadas como cermet, cerámico-metálicas. Estos compuestos son esencialmente agregados de partículas de carburo de tungsteno unido con cobalto mediante sinterización en fase líquida (Yao, 1998). El cobalto, actúa como cementante y la fase cerámica está formada por las partículas de carburo.

Es ampliamente utilizado frecuentemente como material de corte para mecanizado y también en recubrimientos que van a ser usados en aplicaciones en las que se necesita una alta resistencia al desgaste por sus excelentes propiedades tribológicas las cuales son

atribuidas a su buena adhesión al sustrato, buena cohesión, baja porosidad, baja tendencia a formar fases frágiles y alta dureza. Cuando son depositados con la técnica de alta velocidad-oxígeno-combustible (HVOF), poseen buen comportamiento hasta los 500 °C y buena adherencia al sustrato gracias a las elevadas velocidades de proyección (Blanco 2014).

2.7 NANOTUBOS DE CARBONO

Los nanotubos de carbono son una forma alotrópica del carbono, en una configuración cilíndrica nanométrica, formados por redes hexagonales de carbono curvas y cerradas, que resulta de enrollarse una o varias capas concéntricas de láminas similares al grafito sobre sí mismo, con diámetro en el rango de 0,5 nm a 10 nm y longitudes que pueden alcanzar 1 mm. Los que presentan una capa de grafito son llamados nanotubos de carbono de capa simple y los que poseen varias capas concéntricas, unas dentro de otras con diámetros crecientes desde el centro, son denominados nanotubos de carbono multicapa.

Debido a las excelentes propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas, hoy en día los nanotubos de carbono han sido añadidos como refuerzos a aleaciones en compuestos cuya matriz sea polímeros, cerámicos o metales, creando nuevos materiales con nuevas características.

2.7.1 Dispersión de los nanotubos de carbono

Los métodos de producción de los nanotubos de carbono a menudo dan como resultado un producto que tiene una variedad de dimensiones, también se presentan en forma de grandes aglomerados con tamaños del orden de varios micrones, donde las fuertes interacciones de Van der Waals entre los nanotubos impiden su completa dispersión, lo cual ha representado la mayor limitación en la preparación exitosa de estos materiales, debido a que si no son debidamente dispersados homogéneamente no se

consiguen las propiedades deseadas. Los aglomerados de nanotubos pueden ser difíciles de separar sin dañarlos de diferentes maneras. Muchos de los métodos de dispersión pueden causar fragmentación de los nanotubos. Los métodos que existen para la dispersión de los nanotubos se pueden dividir en métodos mecánicos y métodos químicos los cuales se mencionaran a continuación

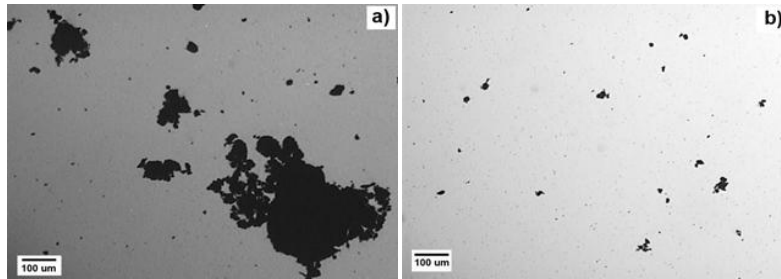
2.7.1.1 Métodos mecánicos.

Estos métodos consisten en aplicar una cantidad de energía a los agregados de la mezcla que produce un esfuerzo local de corte venciendo las fuerzas de cohesión, dando como resultado la dispersión de los nanotubos. El reto que presentan estos métodos esta en escoger una técnica que aporte la cantidad de energía necesaria para vencer las fuerzas cohesivas de los CNT y por otro lado mantener la morfología de cada partícula de nanotubo es decir que la energía aportada debe ser menor que la requerida para fracturar los nanotubos (Huang 2012).

2.7.1.1.1 Ultrasonido

La dispersión de los nanotubos de carbono en el solvente como el alcohol se lleva a cabo aplicando ondas de ultrasonido, en el que los altos esfuerzos de corte generados durante la cavitación ultrasónica, fragmentan los aglomerados de nanotubos de carbono. En la Figura 1 se muestran imágenes de micrografías ópticas de la dispersión de nanotubos de carbono obtenida al aplicarse ondas de ultrasonido. Dependiendo de la concentración empleada, la alta dispersión de los nanotubos aumenta considerablemente la viscosidad del medio, debido a un incremento en la interacción superficial entre los nanotubos y el medio, como resultado del incremento en la relación área superficial-volumen, por lo que el uso de este método se ve limitado para aplicaciones que requieren baja concentración de nanotubos de carbono (< 0.5 % en peso). Sin embargo este método también tiene desventajas, cuando se produce el proceso de corte al separar los nanotubos las paredes pueden resultar dañadas desmejorando su calidad y sus propiedades.

Figura 10. Efecto de la aplicación de ondas de ultrasonido en la dispersión de nanotubos de carbono en solución acuosa al 1% en peso. a) Sin ultrasonido. b) Con ultrasonido.



Fuente: Ingenieros.es; pagina web con dominio: <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/el-uso-de-nanotubos-de-carbono-mejora-las-propiedades-de-los-revestimientos/4848>

Existen dos métodos principales para entregar la energía ultrasónica a los líquidos, el baño ultrasónico y la sonda ultrasónica los cuales se explicaran a continuación.

- Baño ultrasónico

Se utiliza un dispositivo como el de la figura que transforma la energía eléctrica en energía mecánica. Este equipo genera ondas ultrasónicas por la oscilación de los transductores piezoeléctricos con una frecuencia aproximada de 20 kHz. En general, un aparato de ultrasonidos incluye un recipiente, lleno de agua u otro medio líquido, que pueden transmitir las ondas que se emiten por los transductores.

Figura11. banco de baño ultrasónico



Fuente: C.I. M&M Instrumentos tecnicos S.A.S.; pagina web con dominio:
http://www.myinstrumentostecnicos.com/sitio/productos_mo.php?it=2184

- Sonda ultrasónica

En este método se utiliza una sonda que acorta su distancia en el centro ver figura para amplificar las ondas acústicas generadas por el transductor este método ofrece una mayor intensidad que el baño ultrasónico y una mayor regularidad en la propagación de la onda. Este método es considerado más eficaz que el anterior debido a que entrega una mayor cantidad de energía por unidad de volumen.

Figura12. sonda ultrasónica



Fuente: C.I. M&M Instrumentos tecnicos S.A.S.; pagina web con dominio:
http://www.myinstrumentostecnicos.com/sitio/productos_mo.php?it=2184

2.7.1.1.2 Mezcla por impacto- molino de bolas

Los molinos de bolas de baja energía se han utilizado en diferentes investigaciones para reforzar distintos materiales metálicos y cerámico-metálicos con nanotubos entre algunas están Bakshi y colaboradores (2009) reforzaron con 5% y 10% de CNTs mezclado con un molino de bolas durante 48 horas una aleación de aluminio y silicio y obtuvieron mejoras en el módulo de elasticidad de 19% y 39%, y en la resistencia a la fluencia en 17,5% y 27% respectivamente para cada caso.

Shi y colaboradores (2008), , mezclaron con un molino de bolas en solución de etanol por un tiempo de 10 horas, 0,4%, 0,8% y 1,6% de nanotubos de pared múltiple (MWCNTs) con carburo de tungsteno con un recubrimiento de polvos de WC-10%Co . Concluyeron que el recubrimiento reforzado con 0,4% de MWCNTs fue el que presentó los mejores valores respecto al resto de los estudiados.

Esawi y Morsi (2007) demostraron que mezclar CNT con polvos de aluminio mediante un molino de jarras durante 48 horas, permite obtener una dispersión eficaz de los CNTs en el compuesto. El mismo Esawi junto a colaboradores en el año 2010 mezclaron CNTs en una matriz de aluminio, por medio de un molino de bolas por 30 minutos, consiguiendo que para porcentajes superiores al 2% de CNTs no se obtiene buena dispersión de los nanotubos en la mezcla, y para porcentajes inferiores al 2% hay mejoras en las propiedades mecánicas debido a una dispersión adecuada.

Da Conceicao y Olivo (2011) mezclaron 0,35% de nanotubos de carbono con partículas micrométricas de WC-12%Co en un molino de bolas para evaluar la influencia que tiene el procedimiento de mezclado sobre la resistencia al desgaste y propiedades mecánicas de recubrimientos depositados mediante la técnica HVOF. Determinaron que el tiempo de mezclado de los nanotubos de carbono con los polvos WC-12%Co microestructurados influyen significativamente. El tiempo de mezclado de 36 horas fue el que presentó mejores resultados al ofrecer la mejor dispersión de los nanotubos de carbono en la mezcla.

Figuroa y Santoyo (2013) evaluaron la influencia en las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste de recubrimientos de WC-12%Co al ser mezclados con 0,35% de nanotubos de carbono mediante un molino de bolas, la muestra sometida a 36 horas de mezclado posteriormente depositados sobre un sustrato de acero AISI 1020. Realizaron ensayos y concluyeron que la adición de nanotubos de carbono es responsable de las mejoras. La condición que presentó los mejores resultados fue la muestra sometida a 36 horas de mezclado reforzada con nanotubos de carbono, demostrando la mejor distribución de nanotubos de carbono.

Sin embargo en otras investigaciones como la de Blanco Y Zavatti (2014) no se obtuvieron buenos resultados al utilizar un molino de bolas ya que se redujo significativamente el tamaño de las partículas de WC-Co impidiendo su proyección térmica.

También se han utilizado molinos de alta energía para reducir la distribución de diámetros y abrir los nanotubos para mejorar la absorción de gases. Sin embargo se ha observado que una gran cantidad de carbono amorfo es creado, indicado que los nanotubos han sido destruidos y que el método de molienda de alta energía es destructivo.

2.7.1.1.3 Molienda por frotamiento

Sobre este método hay poca investigación, consiste en moler los nanotubos en un mortero con un fluido agente moledor para crear una pasta y dispersar los aglomerados, este método puede ser realizado a mano pero dependiendo del agente pueden variar los resultados, este método puede producir defectos y destruir los nanotubos.

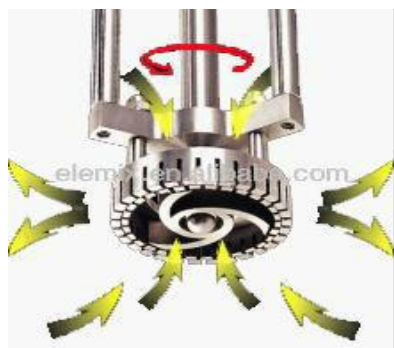
2.7.1.1.4 Mezclado de alto cizallamiento

un rotor o impulsor, junto con un componente estacionario conocido como un estator, o un conjunto de rotores y estatores, se utiliza ya sea en un tanque que contiene la solución a ser mezclado, o en un tubo a través del cual pasa la solución, para crear cizalla.

El fluido se somete a cizallamiento cuando pasa por un área con una velocidad diferente con respecto a un área adyacente. Un mezclador de alto cizallamiento utiliza un impulsor giratorio o rotor de alta velocidad, generalmente accionado por un motor eléctrico. La velocidad del fluido en el diámetro exterior del rotor, será más alta que la velocidad en el centro del rotor, y es esta diferencia de velocidad que crea cizallamiento ver figura.

Un componente estacionario puede ser utilizado en combinación con el rotor, y se conoce como el estator. El estator crea una brecha de cerca holgura entre el rotor y en sí y forma una zona de muy alta cizalla para el material a medida que sale del rotor.

Figura13. Molienda por cizallamiento (rotor)



Fuente: Pagina web con dominio:
<http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo329/1s10/projects/reports/AlfaroAlvarez/proyecto.html>

2.7.2 Métodos Químicos

Consiste en mejorar la dispersión de los nanotubos, escogiendo un medio que sea capaz de influenciar la interacción de diferentes maneras a través de solventes o polímeros que produzca una repulsión que venzan las fuerzas de cohesión.

2.7.2.1 Tratamientos acidos

Es una manera de limpiar los nanotubos de impurezas. Se combinan con la oxidación térmica usualmente los nanotubos se hierven por largos periodos de tiempo y luego se queman en aire u oxígeno para eliminar los residuos de carbono y otros metales, la oxidación también corta los aglomerados separándolos en tamaños más pequeños mejorando su dispersión. Sin embargo es un método agresivo ya que al someter los nanotubos a ácidos puros y a elevadas temperaturas pueden desintegrarse.

2.7.2.2 Uso de surfactantes

Para crear una repulsión electrostática que pueda contrarrestar las fuerzas de van der Waals y así prevenir el aglomerado de partículas. Este balance de fuerzas atractivas y repulsivas crea una dispersión termodinámicamente estable que puede resultar en la separación de los aglomerados en partículas individuales.

Algunos de los surfactantes utilizados en diferentes investigaciones son el dodecil sulfato de sodio, Triton X-100, dodecil sulfato de litio, dando buenos resultados en la dispersión de nanotubos multicapa y capa simple, la goma arábiga también ha sido reportada como buen estabilizante en agua. En contraste han sido reportados como no eficientes estabilizantes de nanotubos el alcohol de vinilo, dodecil-trimetil bromuro de sodio, óxido de etileno, entre otras sustancias. Un problema que se presenta con los surfactantes es removerlos de una manera sencilla del producto final.

CAPITULO III

MARCO METODOLOGICO

3.1 Identificación del problema

En vista de que las maquinas existentes, para el mezclado de polvos de carburo de tungsteno, nanotubos de carbono necesarios para la recuperación de piezas mecánicas por medios de deposición de material mediante la técnica de HVOF, son de muy baja capacidad; surge la necesidad de diseñar y construir una máquina capaz manejar una mayor cantidad de polvos, logrando abastecer demandas de carácter industrial y reducir tiempos de espera.

Para delimitar el problema se deben tomar ciertas restricciones para conseguir una solución que cumpla con la necesidad planteada por lo que se precisara dichas restricciones.

- La máquina debe ser de fácil manejo
- El modelo y sus piezas deben ser de fácil fabricación así como económica
- Optima operatividad y efectividad

3.2 Tormenta de ideas

Con el fin de generar las ideas preliminares de la máquina, se entrevistó a un grupo de personas en su mayoría docentes y profesionales del área de termo rociado y procesos de fabricación, se le explicó brevemente el problema así como el tipo de mezcla que se requiere para la deposición de material , luego se les pidió que pensarán en una solución para la obtención de una mezcla homogénea, de manera eficiente y eficaz; además de ello se recogieron unos bosquejos que ejemplificaran las ideas sugeridas.

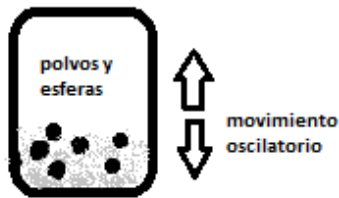
3.3 Perfeccionamiento del problema

Al momento de poner en práctica el perfeccionamiento del problema para cada caso propuesto en la tormenta de ideas, con la finalidad de optimizarlas, se obtuvieron las siguientes propuestas.

Propuesta N°1- Mezclador vibratorio

El sistema consta de un contenedor donde se depositan los polvos a mezclar y las esferas que producirán la dispersión, el recipiente a través de un mecanismo produce un movimiento oscilatorio que transfiere energía a los polvos por medio de las esferas produciendo una mezcla homogénea.

Figura14. Mezclador Vibratorio

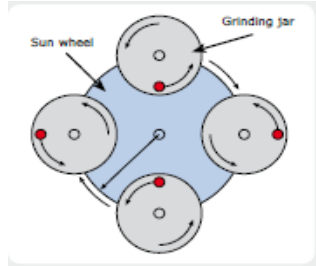


Fuente : Slideshare; pagina web con dominio: <http://es.slideshare.net/Prymer/formas-farmacuticas-3625629>

Propuesta N°2- Molino planetario

Consta de dos o más contenedores que producen un movimiento similar al de los planetas. Los contenedores rotan sobre su propio eje y a la vez giran alrededor de un punto en común. La fuerza centrífuga producida por el movimiento es transferido a los polvos y esferas contenidos en el vial produciendo la dispersión y el mezclado.

Figura15. Molino planetario

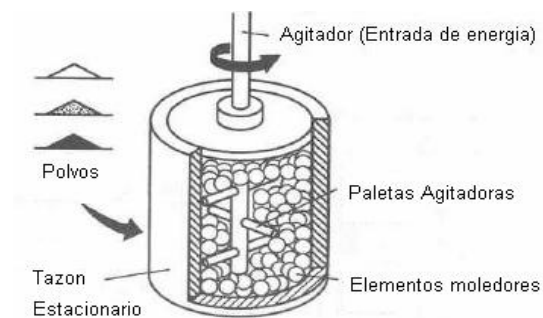


Fuente: El mundo de las Maquinas . pagina web con dominio : <http://solucionar-problemas-maquinaria.blogspot.com/2013/07/transmisiones-planetarias.html>

Propuesta N°3- Molino Atritor

Consiste en un contenedor vertical fijo donde por medio de un agitador se transfiere energía a los polvos y esferas para producir el mezclado.

Figura16. Molino Atritor



Fuente: FMS. Formats Construccion Machinery Co., Ltd. Pagina web con dominio: <http://tritadoras-de-roca.com/wiki/1386.html>

Propuesta N°4- Ultrasonido por medio de baño ultrasónico

Esta propuesta sugiere la utilización de un baño ultrasónico, un dispositivo capaz de transformar la energía eléctrica en energía mecánica. Este equipo genera ondas ultrasónicas por la oscilación de los transductores piezoeléctricos. Este mecanismo presenta un recipiente que contiene el polvo a dispersar en un medio acuoso, que pueden transmitir las ondas que se emiten por los transductores, para posteriormente ser agregados a otras mezclas.

Figura17. Banco de baño ultrasónico



Fuente: C.I. M&M Instrumentos técnicos S.A.S.; página web con dominio: http://www.myminstrumentostecnicos.com/sitio/productos_mo.php?it=2184

Propuesta N°5- Ultrasonido por medio de sonda ultrasónica

Para esta idea se recurre a una sonda; dicho mecanismo presenta una disminución longitudinal en el centro, con el fin de amplificar las ondas acústicas generadas por el transductor. Mediante este sistema se logra proporcionar mayor intensidad que el baño ultrasónico y una mayor regularidad en la propagación de la onda. Este método es considerado más eficaz que el anterior debido a que entrega una mayor cantidad de energía por unidad de volumen.

Figura18. Sonda Ultrasónica



Fuente: C.I. M&M Instrumentos tecnicos S.A.S.; pagina web con dominio:
http://www.myminstrumentostecnicos.com/sitio/productos_mo.php?it=2184

Propuesta N°6- Mezcla por impacto- molino de bolas (tambor rotatorio)

Para esta propuesta se considero construir unos contenedores en forma cilíndrica (tambores) que serán sustentados por un par de rodillos. Uno de ellos motorizado, acoplado a un motor eléctrico por medio de un sistema de transmisión logrando así que los contenedores sean capaz de mezclar el contenido en su interior por medio de un moviendo rotacional. Para que se logre la función de dispersión se requiere de unos cuerpos mezcladores; en este caso particular se menciona la utilización de esferas.

Figura 19 . Mezcla por impacto- molino de bolas (tambor rotatorio)



Fuente: Jiangsu Pengfei Group Co., Ltd. china machinery. Página web con dominio :
http://www.0086kilnmill.com/x-product_detail04/id/30.html

Propuesta N°7- Mezcla y molienda por frotamiento

Según esta propuesta se debe colocar cada uno de los diferentes polvos a mezclar, en nuestro caso carburo de tungsteno, nanotubos de carbono, acompañado por un fluido (medio acuoso) y un tipo de agente demoledor. Se procedería de manera manual al mezclado de los componentes contenidos en el mortero mediante el uso de mango/mano.

Figura 20. Mezcla y molienda por frotamiento

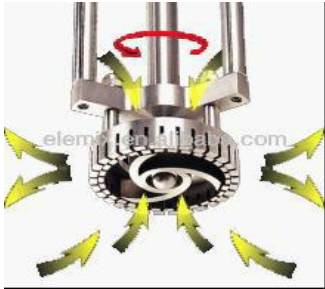


Fuente: Los utensilios del Chef. Catalogo en línea con dominio:
<http://www.losutensiliosdelchef.com/MORTERO-DE-MARMOL-20-CMS.html>

Propuesta N°8- Mezclado de alto cizallamiento

Esta idea presenta una solución basada en uno varios rotores fijados a un elemento estacionario llamado estator. Este conjunto debe ser colocado en un tanque que contenga la mezcla a tratar. Los polvos se combinan con el medio acuoso, etanol, y son sometidos a esfuerzos de cizallamiento cuando pasa por un área con una velocidad diferente con respecto a un área adyacente. La velocidad del fluido en el diámetro exterior del rotor, será más alta que la velocidad en el centro del rotor, y es esta diferencia de velocidad que crea cizallamiento.

Figura 21. Mezclado de alto cizallamiento



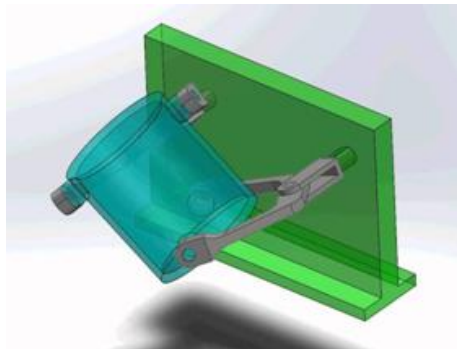
Fuente: Pagina web con dominio:

<http://profesores.elo.utfsm.cl/~agv/elo329/1s10/projects/reports/AlfaroAlvarez/proyecto.html>

Propuesta N°9- Mezclador tridimensional (Túrbula)

Consiste en un contenedor que está expuesto a un movimiento tridimensional de rotación traslación e inversión que somete a los polvos a un vaivén continuo y cambios constantes de dirección produciendo una mezcla homogénea.

Figura 22. Mezclador Túrbula



Fuente: Holzwarth. pagina web con dominio:

[http://holzwarth-](http://holzwarth-cad.net/Joomla/index.php/samples/kinematik)

Propuesta N°10- Mezclador de tornillo

Esta propuesta nos presenta un contenedor dispuesto en posición vertical; dicho contenedor es sellado por ambos lados y es atravesado por un eje en forma de espiral, cuyo ancho esta ajustado a él radio interno del contenedor. Según la propuesta el tambor debe ir fijo siendo el eje central el único cuerpo móvil de máquina. En este caso el espiral se vale de la fricción entre los filetes y las paredes internas para dispersar los polvos, por otro lado el movimiento rotatorio del tornillo sin fin es el encargado de asegurar un mezclado homogéneo.

Figura 23. Mezclador de tornillo

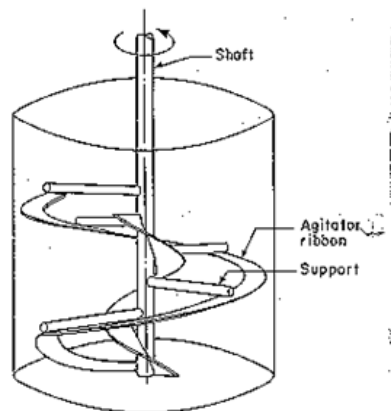


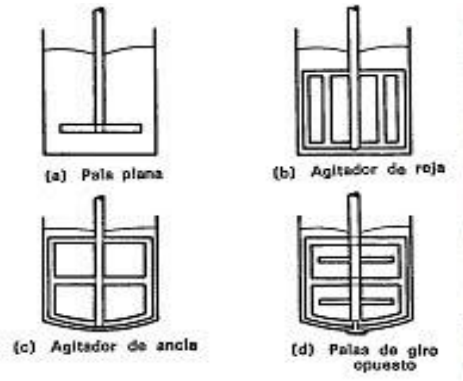
Figure 40. Helical ribbon impeller mixer.

Fuente: Tecno Herminia. Pagina web con dominio: <http://tecnoherminia.blogspot.com/>

Propuesta N°11- Mezclador de paletas

En esta idea se tiene un sistema que consiste en esencia en una o varias paletas horizontales, verticales o inclinadas unidas a un eje horizontal, vertical o inclinado que gira axialmente dentro del recipiente (aunque no siempre está centrado con éste). De esta manera el material que se mezcla es empujado o arrastrado alrededor del recipiente siguiendo una trayectoria circular, de esta manera va mezclando el contenido interior.

Figura 24. Mezclador de paletas

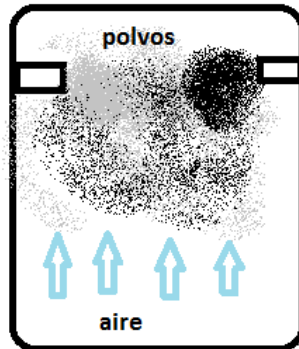


Fuente: Maquinando el saber. artículo online publicado del 22 de septiembre de 2009. página web con dominio : http://maquinandoelsaber.blogspot.com/2009_09_01_archive.html

Propuesta N°12- Mezclado por aire

Consiste en introducir los polvos dentro de una cámara donde se le inyecta aire a alta presión para producir una turbulencia que permita la dispersión de las partículas, logrando una mezcla homogénea. Este método resulta atractivo ya que produce una mezcla limpia que no necesita de agentes que controlen el proceso, ni de medios molidores que modifiquen la granulometría del material.

Figura 25. Mezclado por aire



Fuente: RIVI, grupo técnico, equipos y sistemas de lubricación. Pagina web con dominio: <http://www.rivi.es/sistemas/aireaceite.php>

3.4 Análisis

Una vez expuesto todas y cada una de las posibles soluciones al problema planteado, debemos llevar a cabo un proceso de selección, por medio de una serie de criterios que especificamos a continuación:

- **Durabilidad:** Se desea una solución que dure el mayor tiempo posible sin tener la necesidad de realizar renovaciones.
- **Instalación, implementación:** Se refiere a lo fácil que puede ser la instalación de un elemento o la implementación de un proceso para la solución.
- **Costo:** Se refiere a que tan económico será la solución, más economía mayor puntuación.
- **Efectividad:** Se refiere a lo efectivo que sea la solución al problema planteado, que se haya utilizado en distintas aplicaciones con resultados exitosos, además de que sea de baja transferencia de energía para no afectar la granulometría de los polvos.

- **Adquisición de los componentes:** Se refiere a la facilidad y factibilidad para obtener la mayor cantidad de elementos en el mercado a la hora de realizar el diseño.
- **Tiempo de construcción:** Es la cantidad de tiempo necesaria para la construcción y ensamblaje del equipo.
- **Operatividad:** Se refiere a la facilidad con que un diseño determinado puede ser manejado u operado por seres humanos.
- **Versatilidad:** La capacidad de adaptarse con facilidad y rapidez a diversas funciones

3.5 Matriz de priorización

La matriz de priorización es una herramienta que permite la selección de opciones sobre la base de la ponderación y aplicación de criterios. Hace posible, determinar alternativas y los criterios a considerar para adoptar una decisión, priorizar y clarificar problemas, oportunidades de mejora y proyectos y, en general, establecer prioridades entre un conjunto de elementos para facilitar la toma de decisiones.

Se fijaron criterios de selección a los cuales se les atribuyeron puntuación del 1 al 5, para realizar el filtro de las ideas se evaluó cada uno de los criterios en cada una de ideas seleccionando las que mayor puntuación obtengan.

Detallando la escala nos encontramos con:

- La menos favorable (1).
- Poco favorable (2).
- Favorable (3).
- Muy favorable (4).
- La más favorable (5).

Tabla . Matriz de Priorización

| CRITERIO/PROPUESTA | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Durabilidad | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Implementación | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Costo | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 4 | 5 | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| Efectividad | 2 | 2 | 1 | 4 | 4 | 3 | 1 | 3 | 4 | 2 | 1 | 3 |
| Adquisición | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 4 | 4 | 1 | 1 | 2 | 4 | 2 |
| Tiempo | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 4 | 5 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| Operatividad | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Versatilidad | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 5 | 2 | 3 | 5 | 5 | 4 | 4 |
| TOTAL | 21 | 21 | 22 | 18 | 19 | 33 | 27 | 23 | 24 | 25 | 27 | 23 |

FUENTE: Elaboración propia con base a resultados de trabajo de campo año 2015

3.6 Propuesta seleccionada

Una vez culminado el proceso priorización de ideas según la matriz de selección, se obtuvo que la propuesta más viable, confiable y efectiva es la sexta "**Mezcla por impacto- molino de bolas (tambor rotatorio)**"

3.7 Realización.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que ofrecen los molinos para la producción de mezclas se planteo un diseño preliminar como se muestra en la figura. En él se plantea la utilización de dos contenedores de igual capacidad para una futura ampliación de la producción, una de las principales ventajas de este modelo es que permite rápida remoción de los recipientes para retirar la mezcla, además de que permite realizar recubrimientos internos a las jarras dependiendo del tipo de mezcla. Para la realización del diseño de la propuesta numero 6 se prepararon los planos de todos los componentes con el fin de presentarlos y discutirlos con personal

capacitado y con experiencia en procesos constructivos con el fin de establecer las características finales tanto de la construcción como el diseño para obtener un producto final que satisfaga las condiciones o requerimiento del diseñador y solventado la necesidad. En la figura se representa esquemáticamente el proceso de mezclado de polvos a través del molino rotatorio

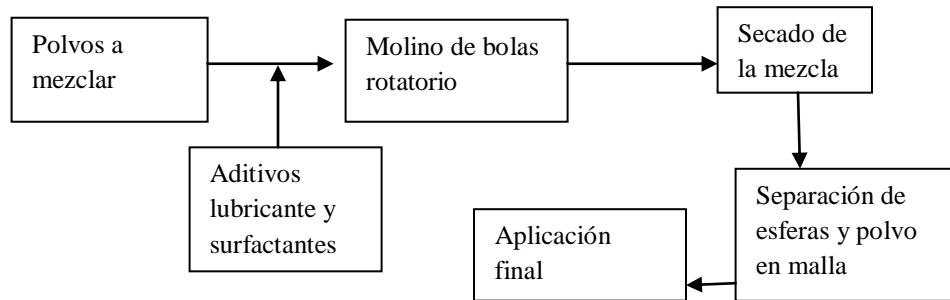
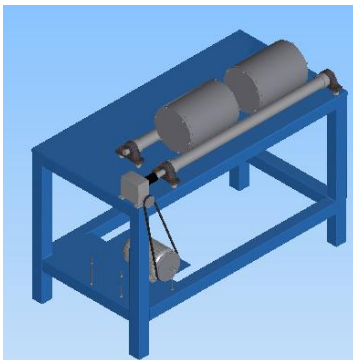


Tabla: Esquema del proceso de mezclado de polvos

Figura 26. Diseño preliminar



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por el CAD Inventor

CAPITULO IV

PROCESO DE DISEÑO

4.1 Especificaciones y requerimientos

4.1.1 Dimensionamiento del molino

La capacidad del molino queda determinada por la carga de polvos y bolas de acero que se deben manipular para generar el proceso de manera apropiada y obtener la cantidad de aleación requerida para posteriores aplicaciones.

4.1.2 Capacidad de trabajo del molino.

Esta capacidad se refiere a la cantidad de material que debe procesarse en el molino, esta capacidad se calcula teniendo en cuenta la suma de las masas de las bolas y el polvo a mezclar, el siguiente calculo permitió determinar de manera confiable la dimensión mínima que debe tener el tazón de molienda.

$$V_{\text{trabajo}} = V_{\text{bolas}} + V_{\text{povos}} + V_{\text{liquido}} \quad \text{Ec.3 Volumen de trabajo como suma de V parciales}$$

El volumen de los polvos que se pueden alear se puede generalizar mediante la siguiente fórmula:

$$V_{\text{povos}} = x \frac{m}{\rho_a} + (1 - x) \frac{m}{\rho_b} \quad \text{Ec.4 Ecuación general de Volumen}$$

Donde x es el porcentaje en fracción del primer material, en peso, m la masa total, ρ_a la densidad del primer material y ρ_b la densidad del segundo material. En el molino se pretende mezclar WC-12Co con 0.35% en peso de nanotubos de carbono.

Se tomaron los datos de las densidades de los materiales (Aprox. $\rho_{WC} = 14.5 \text{ g/cm}^3$ $\rho_{WC} = 1.3 \text{ g/cm}^3$) y con la premisa de una capacidad de producción aproximada de 15Kg se sustituyen los valores en la formula y se obtiene.

$$V_{\text{polvos}} = 0.9965 \frac{15000 \text{ g}}{14.5 \text{ g/cm}^3} + 0.0035 \frac{15000}{1.3 \text{ g/cm}^3} = 1071.24 \text{ cm}^3 \quad \text{Ec.}$$

A este valor se le agrega un 10% por los espacios intersticiales y las porosidades entre los polvos debido a que la densidad volumétrica de los polvos en estado suelto es menor a la densidad que tendrían si se fundieran en una masa solida (Groover 2007).

$$V_{\text{polvos}} = 1.1 \times V_{\text{polvos}} = 1178.4 \text{ cm}^3 \quad \text{Ec.5 Factor de Groove}$$

En el volumen de trabajo también se debe considerar el agente controlador del proceso o el líquido que actuara como surfactante para evitar la soldadura y aglomerados de partículas, según la bibliografía este valor no debe exceder en 5% en peso de la mezcla total. En este caso particular se tomara como referencia Etanol ya que es ampliamente utilizado para este tipo de aplicaciones, con una densidad de 0.8 g/cm^3 y 5% en peso de la mezcla.

$$V_{\text{líquido}} = x_{\text{liq}} \frac{m}{\rho_{\text{liq}}} = 0.05 \frac{15000 \text{ g}}{0.8 \text{ g/cm}^3} = 937.5 \text{ cm}^3$$

Como se discutió anteriormente una de las especificaciones importantes en el diseño del molino es la relación de peso bolas/polvos, esta relación se seleccionó basado en referencias bibliográficas pertinentes, en donde se estima que para propósitos investigativos una relación de 10:1 hasta 1:1 es suficiente. En este caso se tomó una relación de 1:1 considerado para una molienda suave para no reducir el tamaño de las partículas ya que perjudicaría el posterior proceso de termorociado y se considera que el material de las esferas es WC-Co, sustituyendo los valores se obtiene.

$$V_{\text{esferas}} = \frac{m \text{ bolas}}{\rho \text{ wc}} = \frac{10000 \text{ g}}{14.5 \text{ g/cm}^3} = 1034.5 \text{ cm}^3 \quad \text{Ec.}$$

Al empaquetar esferas solidas en un volumen aproximadamente 30% de este queda vacio.

$$V_{\text{esfera}} = 1.3 \times V_{\text{esfera}} = 1344.8 \text{ cm}^3 \quad \text{Ec.}$$

Ahora para calcular la capacidad de trabajo se suman el volumen total de los polvos, las esferas y el agente liquido.

$$V_{\text{trabajo}} = V_{\text{esferas}} + V_{\text{polvos}} + V_{\text{liquido}} = 1344.8 \text{ cm}^3 + 1178.4 \text{ cm}^3 + 937.5 \text{ cm}^3 = 3460.07 \text{ cm}^3$$

Ec.

4.1.3 Capacidad total del molino.

Para que la aleación mecánica tenga lugar, las bolas de acero deben tener el espacio libre suficiente para moverse y propiciar repetidos impactos y fricción en las paredes del tazón, de acuerdo a las fuentes consultadas, la capacidad total del contenedor de molienda debe ser el doble de la capacidad de trabajo calculada, por lo tanto.

$$V_{\text{molino}} = 2 \times V_{\text{trabajo}} \quad \text{Ec.6 Volumen total en función a Volumen de trabajo}$$

$$V_{\text{molino}} = 2 \times V_{\text{trabajo}} = 2 \times 3460.7 \text{ cm}^3 = 6921.4 \text{ cm}^3$$

4.1.4 Dimensiones del contenedor

Obtenido el volumen del contenedor se puede determinar un diámetro mínimo para el recipiente a partir de la siguiente formula.

$$V_{\text{molino}} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} \quad \text{Ec.7 Volumen de un cilindro finito}$$

Donde D es diámetro del contenedor y L la longitud del mismo. Por recomendaciones técnicas se debe utilizar una relación de L/D que no supere 1.5,

sustituyendo este valor en la ecuación se puede determinar el diámetro del contenedor

$$V_{\text{molino}} = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot 1.5}{4} \rightarrow D^3 = \frac{4 \cdot V_{\text{molino}}}{\pi \cdot 1.5} \rightarrow D = \left(\frac{4 \times 6921.4}{\pi \cdot 1.5} \right)^{1/3} = 18.04 \text{ cm} \quad \text{Ec.}$$

Además

$$\frac{L}{D} = 1.5 \rightarrow L = 27,06 \text{ cm} \quad \text{Ec.}$$

Para facilitar los procesos de fabricación a la hora de la medición del contenedor se escoge un valor de D=18cm y L=25cm además cumplen con la relación L/D = 1.4, sin modificar significativamente el volumen requerido ya que no es un valor crítico si no que sirve como referencia para el dimensionamiento del dispositivo. Además en la práctica pueden variar muchos parámetros como el material a mezclar, el medio líquido, el número de bolas, etc.

4.1.5 Tamaño Máximo de los Elementos Moledores

En los molinos de barras y bolas, los elementos moledores no tiene todos el mismo tamaño, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores.

Nordberg, Fabricante de equipos de molienda (molino de bolas y de barras) recomienda la siguiente fórmula:

$$D_{b \text{ (in)}} = \sqrt{\frac{F(\mu\text{m})Wi}{K \cdot Cs(\%)}} \sqrt{\frac{S\left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3}\right)}{\sqrt{D} \dot{f} t}} \quad \text{Ec.8 Diámetro máximo de cuerpos moledores}$$

Donde D_b es el diámetro máximo de las esferas, F es el tamaño de alimentación de los polvos en micrometros, Wi (Work Index) que es una constante función de la naturaleza del materia obtenido por tablas, K es una constante que vale

200 para molino de bolas, Cs es el porcentaje de la velocidad crítica, S el peso específico en toneladas por metro cubico del material a moler y D el diámetro del molino en pies. La aplicación principal del dispositivo lograr una dispersión adecuada de los nanotubos de carbono dentro de la matriz de WC-Co y no moler o triturar estas partículas, es una tarea complicada determinar el diámetro para proporcionar la energía necesaria que logre la separación de los aglomerados de los CNTs, sin que los elementos moledores afecten el tamaño de las partículas de WC-Co e inclusive los propios nanotubos, ya que depende de muchos factores como número de horas de exposición, proporción de esferas y polvos a mezclar, velocidad de operación, entre otras. Es estudios un estudio realizados (Blanco 2014) se logro una mejora de las propiedades mecánica de la mezcla sin la utilización de elementos moledores, sin embargo en este apartado se propondrá un diámetro de las esferas utilizando como referencia un material blando y dúctil con bajo Wi, como la Barita (Wi= 4.73; $\rho = 3.5 \text{ ton/m}^3$) y con el mismo tamaño del los polvos de WC-Co $F=25 \mu\text{m}$ para que de esta manera no afecte considerablemente los polvos.

$$D_{b (in)} = \sqrt{\frac{25 \times 4.73}{200 \times 70} \sqrt{\frac{3.5}{\sqrt{0.59}}}} = 0.13'' = 3.4 \text{ mm} \text{ el valor comercial mas cercano es de } 3 \text{ mm}$$

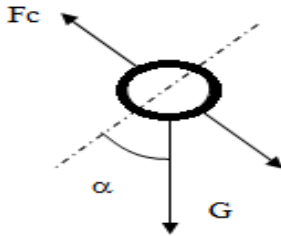
Ec.

4.1.6 Velocidad Crítica

La velocidad crítica para un molino y sus elementos molturantes es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda. El molino, entonces, deberá trabajar a velocidades inferiores a la crítica. A continuación se expone un ejemplo de cálculo de velocidad crítica con

elementos esféricos (bolas). Utilizando un sistema de referencia no inercial y realizando el diagrama de cuerpo libre de la figura se tiene:

Figura 27. esquema de partícula dentro del molino



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo usado

a_c = aceleración centrífuga

Fc= Fuerza centrífuga

$$F_c = m \cdot a_c = m \frac{v^2}{R};$$

Ec.9 segunda ley del movimiento de Newton

Donde R es el radio de giro del contenedor.

Planteando ahora el equilibrio de fuerzas antes mencionado y siendo $G \cdot \text{sen} \alpha$ la componente centrípeta del peso G se llega a:

$$m \frac{v^2}{R} = G \text{sen} \alpha; \quad \alpha \rightarrow 90^\circ \rightarrow \text{sen} \alpha = 1 \quad \text{Reemplazando: } m \frac{v^2}{R} = G \quad \text{Ec.}$$

Si $G = m \cdot g$ y $v = 2 \cdot R \cdot \pi \cdot n = D \cdot n \cdot \pi$, reemplazando:

$$m \cdot g = \frac{m \cdot D^2 \cdot n^2 \cdot \pi^2}{R} \rightarrow g = \frac{D^2 \cdot n^2 \cdot \pi^2}{R} \quad \text{Ec.}$$

Reemplazando $R = D/2$:

$$g = 2D \cdot n^2 \cdot \pi^2 \quad \text{Ec.}$$

Despejando "n" nos queda

$$n^2 = \frac{g}{2D\pi^2} \rightarrow n(\text{rps}) = \frac{0.705}{\sqrt{D(\text{m})}} \quad \text{Ec.}$$

$$n_c(\text{rpm}) = \frac{42.3}{\sqrt{D(\text{m})}} \quad \text{Ec.}$$

$$n_c(\text{rpm}) = \frac{76.63}{\sqrt{D(\text{ft})}} \quad \text{Ec.}$$

Como el diámetro del contenedor tendrá un valor aproximado 18 cm, se calcula la velocidad crítica para ese contenedor.

$$n_c(\text{rpm}) = \frac{42.3}{\sqrt{0.18}} = 99.7 \text{ rpm} \approx 100 \text{ rpm}_c \quad \text{Ec.}$$

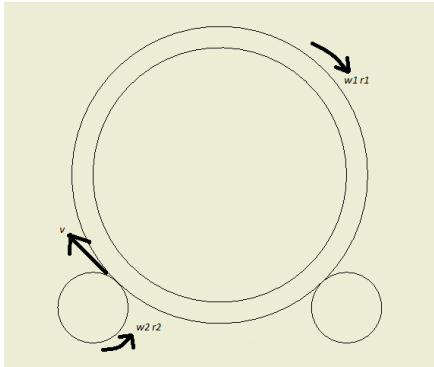
Los molinos de bolas obtienen su máxima eficiencia a trabajar entre el 60%-80% de la velocidad crítica, es decir que para este molino su rango de operación está entre 60-80 rpm.

4.1.7 Velocidad de los rodillos

Como el contenedor estará ubicado sobre unos rodillos que le transmitirán la potencia y el movimiento se debe conocer la velocidad de estos para ello se necesita saber la relación de velocidades entre el rodillo impulsor y el recipiente. Para esto nos apoyamos en la figura. En el punto de contacto entre el recipiente y el cilindro las velocidades son iguales, ω_1 , r_1 son la velocidad angular y el diámetro del recipiente y ω_2 , r_2 son la velocidad angular y el radio del rodillo. De ahí se puede escribir la siguiente relación:

$$\omega_1 x r_1 = \omega_2 x r_2 \rightarrow \omega_2 = \omega_1 r_1 / r_2 \quad \text{Ec.10 Calculo Velocidad angular}$$

Figura 28. disposición del contenedor y los rodillos



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados

Conociendo la velocidad crítica del contenedor y su rango de operación, posteriormente se podrá determinar la velocidad de trabajo de los rodillos cuando se determine el diámetro ideal para ellos, a través de la ecuación anterior.

4.2 Diseño Detallado

4.2.1 Diseño del contenedor

Los recipientes de molienda son una de las piezas importantes del mecanismo, dentro de ellas se depositan los medios molidores y el material a alear, por inducción del mecanismo motriz la energía se entrega al contenedor donde las bolas y material por impacto forman la aleación mecánica. El contenedor se diseñó con un volumen de 6Lt.

Para calcular el espesor de las jarras, se debería tomar en cuenta al esfuerzo a

que están sometidas las paredes del contenedor, sin embargo al ser un molino de baja energía, con medios moledores de diámetros pequeños y que en su mayor parte contendrán polvos de tamaños micrométricos se estima que los esfuerzos generados son bajos. Por ende para el cálculo del espesor se tomara en cuenta otros accesorios como son las los agujeros para los tornillos que sostendrán las tapas de la jarra y la junta torica para asegurar la estanqueidad de fluidos.

En función del diámetro interno mínimo requerido para la jarra calculado previamente 180 mm se puede seleccionar una junta torica u O-ring. El catalogo Parker de fabricante de sello ofrece una guía para la selección del O-ring y el diseño del alojamiento, a partir de ahí se selecciona un un sello con el código 2-262 de la serie estándar con un diámetro externo 177mm y 184mm respectivamente, también con un espesor de 3.53 mm.

4.2.2 Diseño del alojamiento

Por recomendación una vez asentado el sello en su alojamiento, el estiramiento no debe exceder el 7% de su diámetro interior, por este motivo se determina el diámetro externo del alojamiento con un diámetro de 180mm. La acción de sellado se materializa mediante la deformación de su sección circular, obtenida a través de un correcto diseño del alojamiento, para un uso dinámico la deformación debe estar en un rango de 8% a 25%. Para determinar la sección hay que apoyarse en la figura, la ranura L y G se obtienen de la tabla

Figura 29. Alojamiento O-ring

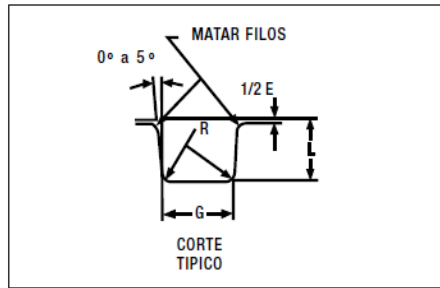


Tabla dimensiones del alojamiento

| TABLA DE DISEÑO | | | | |
|-----------------|----------------------------|----------|-----------------------|--------------|
| Secc. "W" | Dimensiones de Alojamiento | | | |
| | Profundidad "L" | | Ancho "G" ± 0.1 | Radio "R" |
| | Estático | Dinámico | | |
| 1.78 | 1.25 | 1.40 | 2.5 | 0.1 |
| | 1.35 | 1.45 | | |
| 2.62 | 2.05 | 2.25 | 3.7 | 0.1 |
| | 2.15 | 2.30 | | |
| 3.53 | 2.80 | 3.05 | 4.9 | 0.2 |
| | 2.95 | 3.10 | | |

Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

4.2.3 Diseño de agujeros para los tornillos

Ya conociendo el espacio requerido para la junta tortica se puede proceder a determinar los agujeros donde enroscaran los tornillos para sostener las tapas. Para esta aplicación particular los tornillos no están sometidos a presiones internas ni ha fuerzas de separación considerables, su función principal mantener una uniformidad en la presión sobre el sello, por este motivo se selecciona un tornillo de cabeza hueca hexagonal (Allen) que es de fácil adquisición y con un diámetro nominal de ¼” que facilita la remoción de las tapas para la extracción del producto. Como recomendación el espacio excedente para ser tomado en cuenta con el espesor de la jarra debe ser al menos dos veces el diámetro del tornillo.

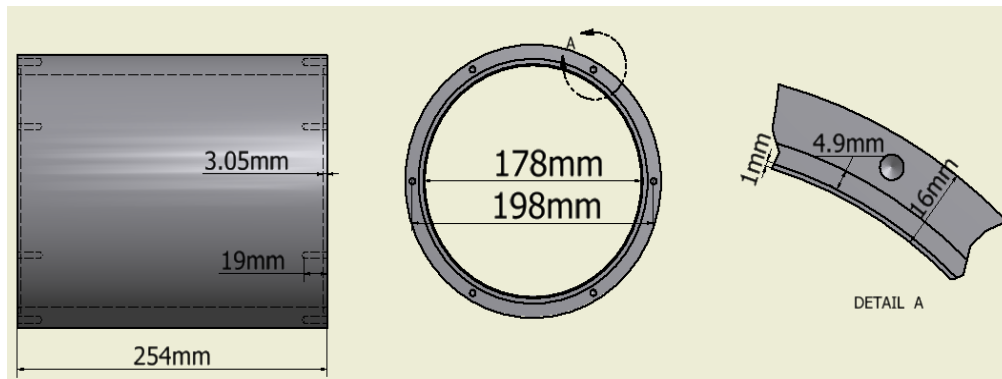
Para determinar el número de tornillos necesarios para mantener la uniformidad de la presión no se deben colocar con una separación mayor de seis diámetros nominales y para mantener un espacio para que entre la llave los tornillos se deben colocar con una separación de 3 diámetros shigley. Una regla aproximada estable la relación.

$$3 \leq \frac{\pi Db}{Nd} \leq 6$$

En función de la ecuación anterior y considerando que la aplicación no se maneja presiones internas y tampoco una gran cantidad de fluidos, en su mayor parte es una mezcla entre un polvo y un líquido surfactante o simplemente polvo, se determina que el número de tornillos necesarios es de 6.

El espesor con que se diseñaron y construirán las jarras es de 16mm, con diámetro interno de 178mm y longitud de 254 mm, la parte frontal de la jarra se realizara un alojamiento de 3.05 mm con un espesor de 4.9mm sobre toda la superficie como se muestra en la Figura donde se deposita un o-ring.

Figura 30. Contenedor y Alojamiento

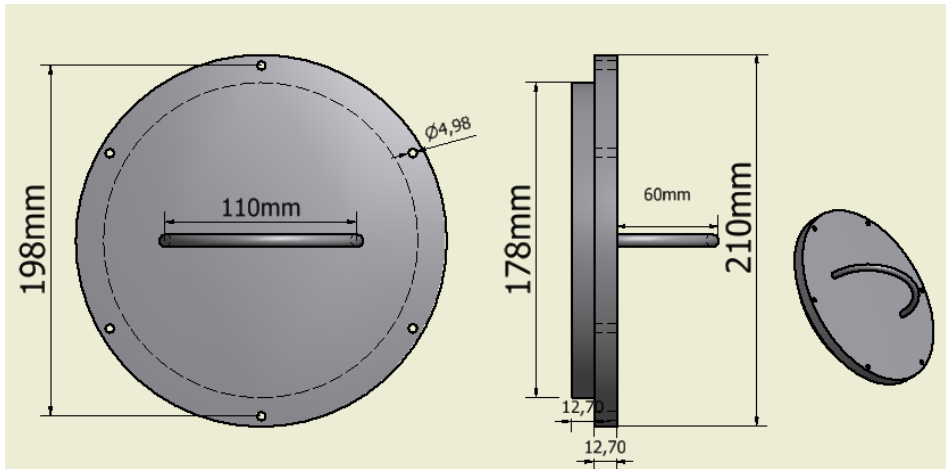


Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de calculo utilizados.

4.2.4 Tapa del recipiente

La tapa del recipiente se diseña en función de de las dimensiones del contenedor debe tener una guía para que calce con el diámetro interior y agujeros para tornillos que coincidan exactamente con los agujeros del contenedor una de las dos tapas debe tener un mango para que pueda ser manipulado el recipiente, en función de estas condiciones se diseña como se observa en la figura

Figura 31. Tapa del recipiente

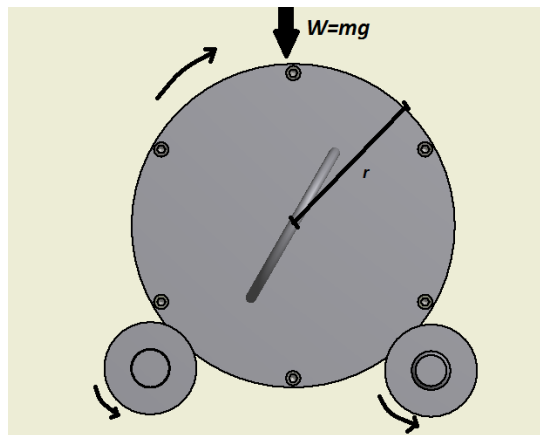


Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

4.2.5 Diseño de los ejes

En la imagen se aprecia la disposición final de los ejes y los recipientes.

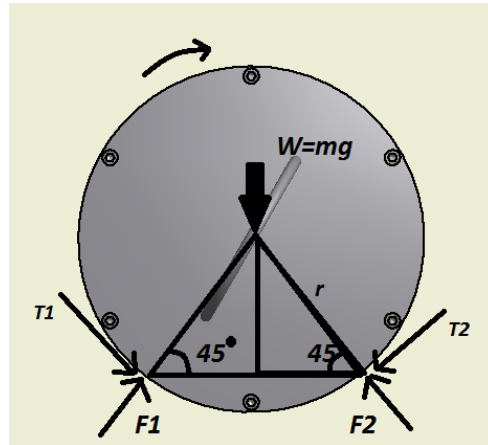
Figura 32. disposición del contenedor



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados

Ahora se realiza el diagrama de cuerpo libre de los elementos por separado, en la figura se observa el recipiente con la fuerza del peso aplicado en el centro de gravedad y las dos reacciones producidas por el contacto entre los ejes.

Figura 33. DCL contenedor



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

El contacto entre el recipiente y los ejes se producen con un ángulo de 45° respecto a la horizontal. Ahora se realiza sumatoria de fuerzas en los ejes Y e X y sumatoria de momentos en el punto 1.

$$\sum F_x = 0; F_1 \cos 45 + T_1 \cos 45 = F_2 \cos 45 + T_2 \cos 45 \text{ Ec.}$$

$$F_1 + T_1 = F_2 + T_2 \quad \text{Ec.11 Sumatoria de Fuerzas en el Eje x}$$

$$\sum F_y = 0; F_1 \sin 45 + F_2 \sin 45 = T_1 \sin 45 + T_2 \sin 45 + mg \text{ Ec.}$$

$$F_1 + F_2 - T_1 - T_2 = \frac{mg}{\sin 45} \quad \text{Ec.12 Sumatoria de Fuerzas en el Eje y}$$

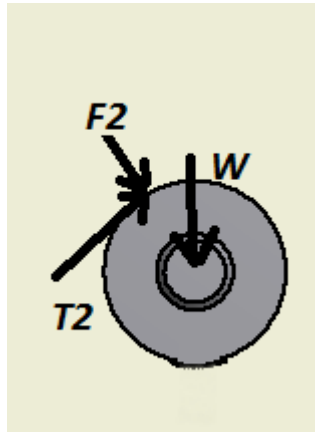
$$\sum M_1 = 0; T_2 \sin 45 \times (2r \cos 45) + mg \times r \cos 45 = F_2 \sin 45 \times (2r \cos 45) \text{ Ec.}$$

$$T_2 + mg \cos 45 = F_2 \quad \text{Ec.13 Sumatoria de Fuerzas en el Eje z}$$

En la figura se presenta el DCL del eje conductor, conociendo la potencia

necesaria para mover el eje, se puede determinar el torque aplicado con la expresión donde P es la potencia en hp y n la velocidad de giro en RPM, y así despejar la fuerza tangencial T2 con la formula, donde D es el diámetro del eje que se propone para el diseño con un valor de 50mm.

Figura 34. DCL (Solicitud de Fuerzas)



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

$$T = 63000 \frac{P}{n} = \frac{63000 \times 0.75}{300} = 157.5 \text{ lb.pul} = 17.8 \text{ N.m Ec.}$$

$$T2 = \frac{T}{D/2} = \frac{17.8 \text{ N.m}}{0.025 \text{ m}} = 712 \text{ N Ec.}$$

Para calcular la fuerza ejercida por contenedor se deben sumar las masas del recipiente más la de los polvos contenidos en su interior. El cálculo de la masa del recipiente se realiza con ayuda del software CAD Inventor en función del diseño realizado previamente, donde arroja un valor de 31.38 kg. Ahora para el cálculo de la masa del polvo debe realizarse en función de la capacidad del molino. Para un cálculo conservador se asumirá que los recipientes se utilizaran al 60% de su

capacidad utilizando WC-Co puro como polvos a mezclar con una densidad aproximada de 14,5 gr/cm³, en función de esto podemos calcular la masa de los polvos.

$$m_{\text{povos}} = 0.6 \times V_{\text{cont}} \times \rho_{\text{wc-co}} = 0.6 \times 6221 \text{cm}^3 \times 14,5 \text{ gr/cm}^3 = 54.12 \text{ kg}$$

Ec.13 calculo de masa en base a Volumen y densidad

Ahora la masa total es:

$$m = m_{\text{povos}} + m_{\text{cont}} = 54.12 \text{ kg} + 31.38 \text{ kg} = 85.5 \text{ kg} \quad \text{Ec.14 Masa total}$$

Conociendo T2 y el peso del contenedor podemos despejar F2 de la ecuación de momentos, y sustituyendo los valores correspondientes nos queda:

$$F2 = T2 + mg \cos 45 = 712N + 592.5N = 1304.5 N \text{ Ec.}$$

Las fuerzas F1 y T1 no son relevantes ya que para el diseño se tomara en cuenta el eje conductor ya que es el que está sometido a mayores cargas. Para realizar el DCL de los ejes se debe tomar en cuenta que las fuerzas obtenidas no son cargas puntuales si no que se distribuyen a lo largo de la longitud del recipiente. Para realizar el cálculo de la fuerza distribuidas se procede a dividir la magnitud de la fuerza entre la longitud total del recipiente

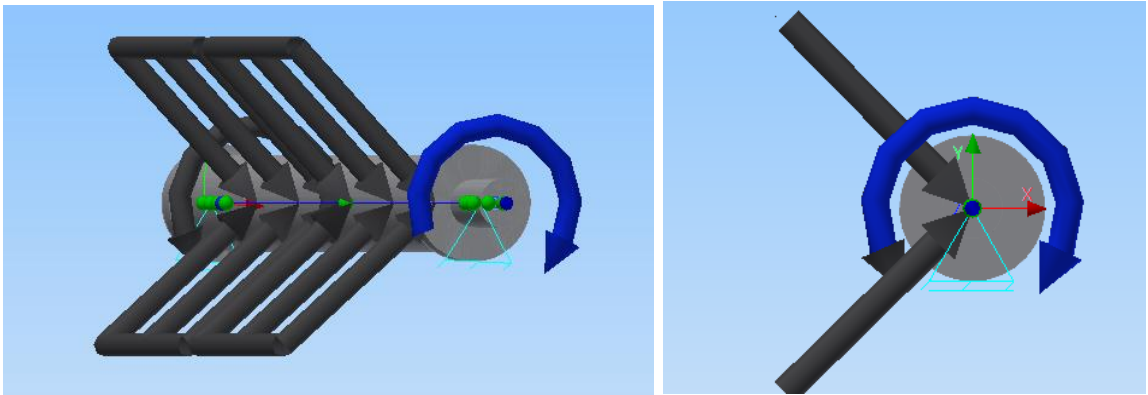
$$F2 = \frac{1304.5N}{27.94 \text{ cm}} = 46.68 \frac{N}{\text{cm}} = \mathbf{4669 \frac{N}{m}} \quad T2 = \frac{712N}{27.94 \text{ cm}} = 25.48 \frac{N}{\text{cm}} = \mathbf{2548.3 \frac{N}{m}}$$

Ec.

Para facilitar el procedimiento de cálculo de los diagramas de fuerzas cortantes y momentos flectores de cada eje, se utilizara la herramienta Shaft design del programa Autodesk inventor donde se ingresan como datos las dimensiones del eje, la posición de los soportes, la magnitud y ángulo de las fuerzas distribuidas y el torque al que está sometido el eje. Para esto se plantea un diseño preliminar con diámetros y dimensiones tentativas en función de medidas y diámetros comerciales donde se evaluarán los esfuerzos a los que están sometidos los componentes que

luego serán comparados con el límite de resistencia a la fatiga del material, para determinar si el diseño es satisfactorio.

Figura 35 -36 . disposición fuerzas sobre los ejes en software inventor

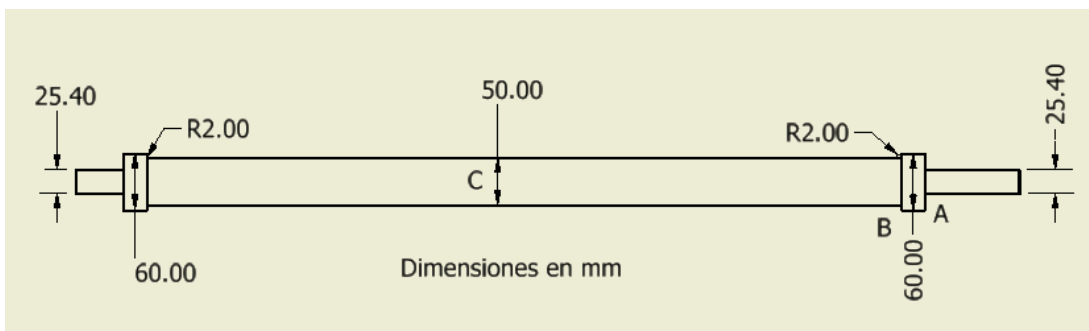


Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

Eje motorizado

Diseño propuesto

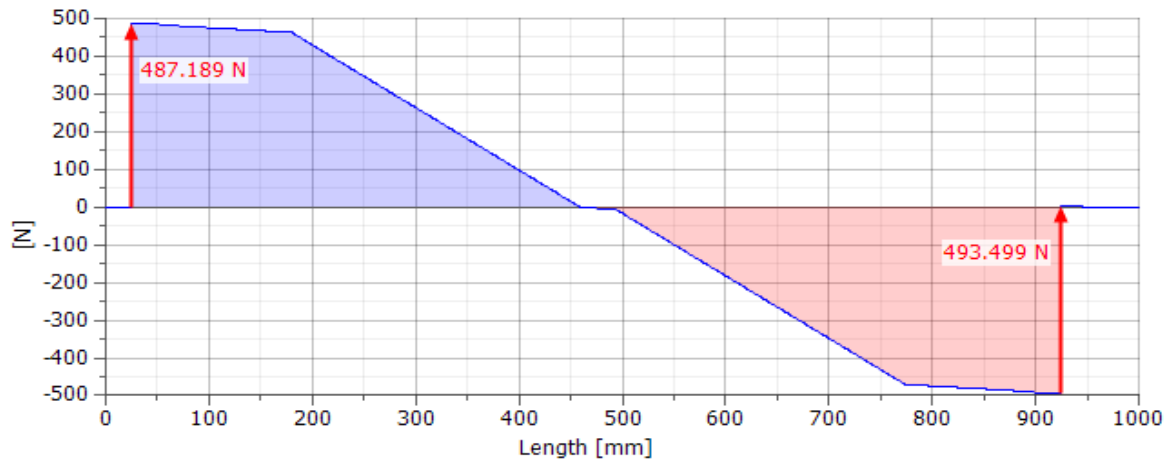
Figura 37. diseño propuesto del eje.



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

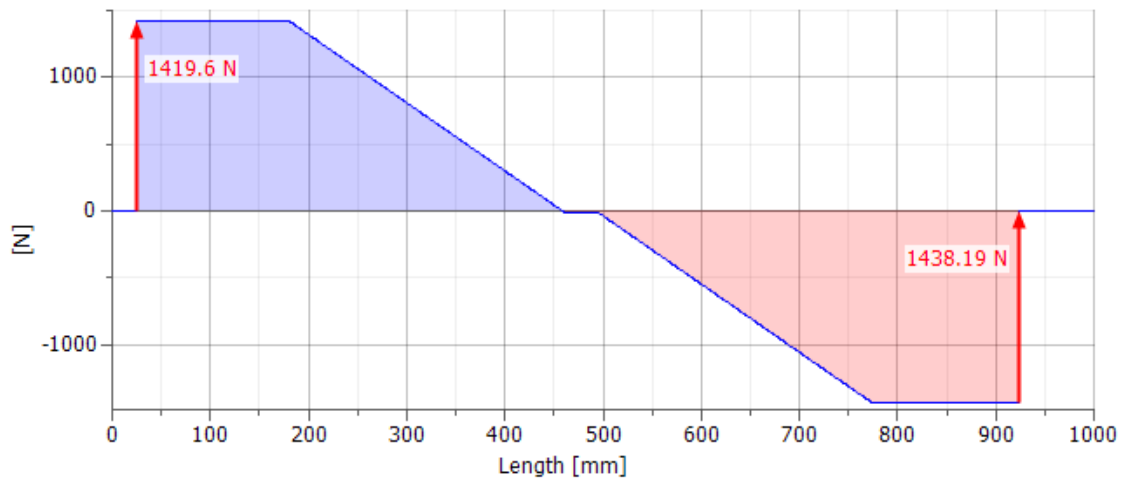
En la figura se observa la disposición de las fuerzas distribuidas mediante el software mencionado donde luego se proceden a calcular los diagramas respectivos.

Figura 38. Diagrama Fuerza cortante planos yz.



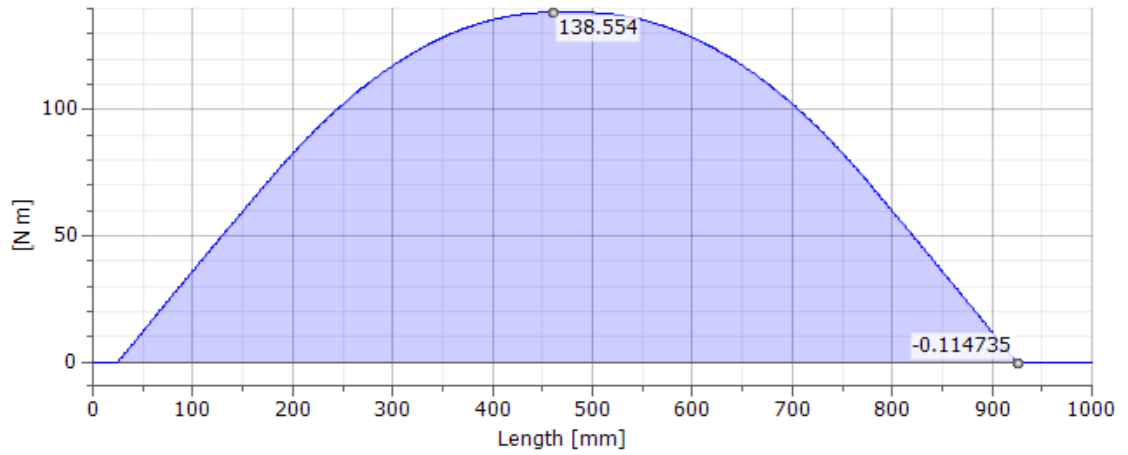
Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

Figura 39. Diagrama Fuerza cortante planos xz.



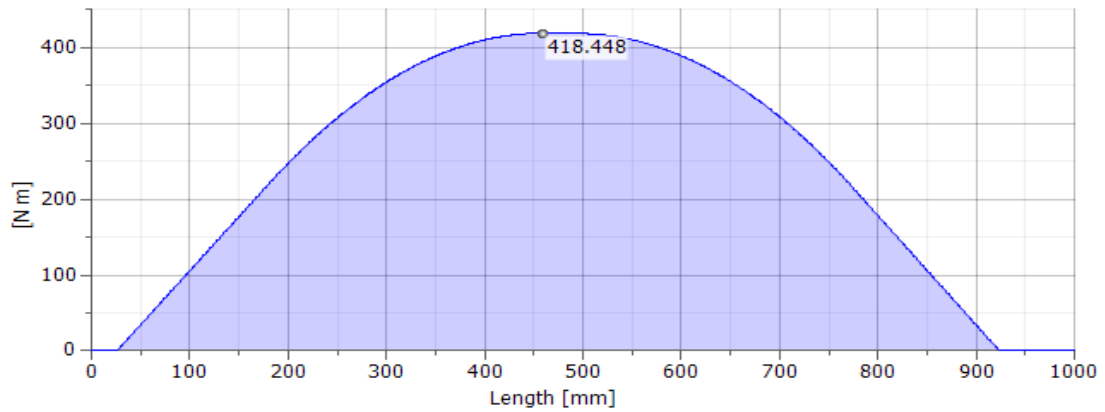
Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

Figura 40. Diagrama de momento flector planos yz



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

Figura 41. Diagrama de momento flector planos yz.



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

Como ya se conoce el diámetro de diseño se utiliza la ecuación de teoría de falla de von mises y goodman modificado donde se despejara el factor de seguridad para determinar si el diseño es factible.

$$D = \left[\frac{32N}{\pi} \left(Kf \frac{Ma}{se} + \frac{\sqrt{3}Tm}{2Sut} \right) \right]^{1/3} \quad \text{Ec.14 Teoria de Falla de Von Mises y Goodman}$$

Donde

N= factor de seguridad se utilizara 2 ya que no es una aplicación con cargas de impacto

Kf= factor concentrador de esfuerzo

Ma= Momento alternante se calcula mediante la expresión $Ma = \sqrt{Mxz^2 + Myz^2}$

Tm= torque medio en la sección

Sut= esfuerzo ultimo a la tracción

Se = esfuerzo a la fatiga

Calculo de factores que modifican el límite de resistencia a la fatiga

Se = Ka Kb Kc Kd Ke Kf Se' el valor de Se' = 0.5Sut para acero duplex Sut= 95kpsi = 655 Mpa

Se' = 0.5 x 95 = 47.5 kpsi = 327.5Mpa

Ka: factor de superficie maquinado; en frio $Ka = aSut^b = 4.51x327.5^{-0.265} = 0.97$

Kb: se calcula para cada punto con un valor promedio de 0.8

Kc: 1 carga flexión

Kd: 1 temperatura ambiente

Ke: 0.814 con 99% de confiabilidad

Kf: 1 diversos factores

Realizando la operación se obtiene $Se = 0.63 \times 327.5\text{Mpa} = 206.32 \text{ Mpa}$

- Punto a: el valor de momento alternante en este punto es $Ma = 37.5 \text{ Nm}$ $Tm = 17.8\text{Nm}$ por la derecha el valor de $Kf = 2.5$ debido al chaflán agudo por el rodamiento y el diámetro de esa zona es de 25.4mm.

$$Nderecha = \frac{D^3 \pi}{32 \left(Kf \frac{Ma}{se} + \frac{\sqrt{3}Tm}{2Sut} \right)} = \frac{0.0254^3 \pi}{32 \left(2.5 \frac{16}{206 \times 10^6} + \frac{\sqrt{3} \times 17.8}{2 \times 655 \times 10^6} \right)} = 3.2 \text{ Ec.}$$

- Punto a: por la izquierda varia el diámetro a 60 mm y con el mismo concentrador $K_f=2.5$ se obtiene

$$N_{\text{izquierda}} = 44.3$$

- Punto b: el valor de momento alternante en este punto es $M_a = 75.1 \text{ Nm}$ $T_m = 17.8 \text{ Nm}$ el valor de $K_f = 2$ por el chaflán redondeado, por la derecha se tiene un diámetro de 60mm y por la izquierda un diámetro de 50 mm, se obtiene:

$$N_{\text{izquierda}} = 28.1; N_{\text{derecha}} = 16.3$$

- Punto c: no hay cambios de sección y no tiene concentradores y con un $M_a = 183.27$ y $T_m = 17.8$ se obtiene:

$$N = 5.6$$

Los factores de seguridad obtenidos son mayores que 2, esto quiere decir que el diseño propuesto es suficientemente resistente para la aplicación.

4.2.6 Durabilidad de la superficie

Cuando dos cuerpos con superficies curvas se presionan entre sí, el contacto lineal cambia a un área de contacto que genera un desgaste en la superficie. La expresión representa el esfuerzo de contacto superficial por la teoría de Herzt, entre dos cilindros Shigley (2008).

$$p_{\text{max}} = \frac{2F}{\pi b l} \quad \text{Ec.15 Ecuación de Contacto Superficial de Herzt}$$

Donde p_{max} es la presión superficial max, F es la fuerza que presiona los cilindros y b se obtiene por medio de la ecuación.

$$b = \sqrt{\frac{2F}{\pi L} \times \frac{\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}} \quad \text{Ec.}$$

Donde E_1, E_2, ν_1, ν_2 son las constantes elásticas y d_1, d_2 son los diámetros de los

cilindros en contacto. Sustituyendo los valores resulta:

$$b = \sqrt{\frac{2x1468.15}{\pi 0.30} \times \frac{2x \frac{1 - 0.3^2}{200x10^9}}{\frac{1}{0.21} + \frac{1}{0.05}}} = 3.38x10^{-5} \text{ Ec.}$$

$$p_{max} = \frac{2x1468.15}{\pi 3.38x10^{-5} x 0.3} = 92,07 \text{ Mpa Ec.}$$

Este valor es bastante inferior a los valores de resistencia al contacto de los aceros por este motivo no representa una complicación para el diseño.

4.2.7 Velocidad crítica del eje

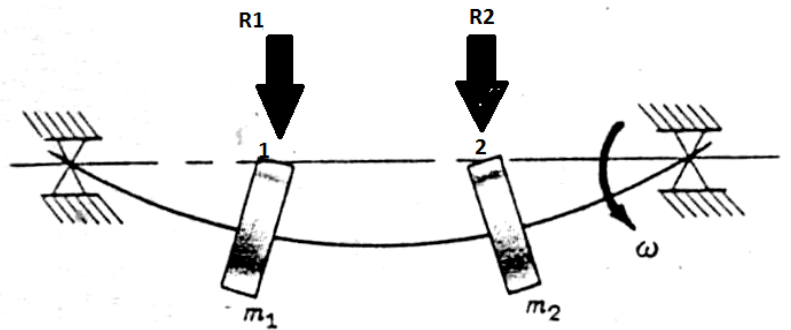
Cuando un eje gira, la excentricidad ocasiona una deflexión debida a la fuerza centrífuga, siempre que estas sean pequeñas no se ocasiona ningún daño, sin embargo existe el problema de velocidad crítica en el cual a ciertas velocidades el eje es inestable y las deflexiones se incrementan hasta la destrucción Shigley (2008). Mediante la curva de deflexión estática se puede obtener una estimación de la velocidad crítica. Existen distintos métodos para su cálculo, en esta sección se utilizara el método de Rayleigh, este es una aproximación a la primera velocidad crítica el cual sobrestima su valor, sin embargo es una buena referencia para el diseño. Se divide la masa distribuida en un número de partes. Se considera la masa de cada parte como si estuviera concentrada en su propio centro de gravedad. La experiencia da el número de subdivisiones que debe usarse, pero puede verse que con una partición no muy refinada se obtiene una buena precisión. La expresión es la siguiente:

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{g \sum \omega_i y_i}}{\sqrt{\sum \omega_i y_i^2}} \quad \text{Ec.16 Ecuación de Rayleigh , Velocidad Crítica}$$

Donde ω_i es el peso de la i -ésima ubicación e y_i es la deflexión en la

ubicación del i-esimo cuerpo. Para el cálculo despreciaremos la masa del eje y se utilizara las fuerzas resultantes de reacción de la masa de los contenedores aplicada como una carga puntual en su centro de gravedad como se observa en la figura, para facilitar el cálculo de la deflexión total del eje en los puntos de estudio los datos serán tomados del programa inventor que proporciona la grafica de la deflexión total resultante del eje bajo las cargas dadas.

Figura 42. representación de la deflexión en el eje.

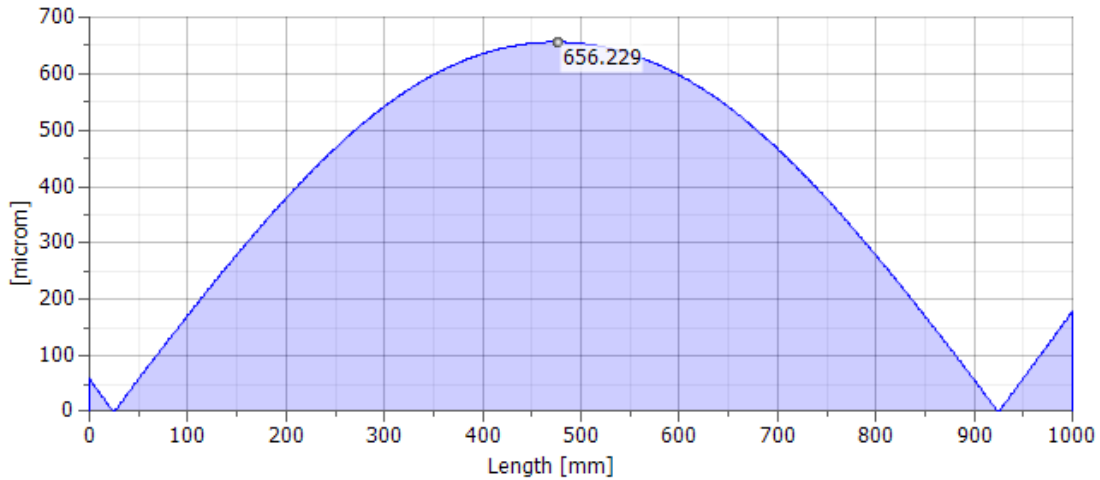


Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

La fuerza resultante en cada punto se calcula con la expresión

$$R = \sqrt{F^2 + T^2} = \sqrt{1304.5^2 + 712^2} = 1468.15N \text{ Ec.}$$

Figura 43. Grafica de la deflexión total resultante



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

Punto 1 deflexión 0.000561 m ; Punto 2 deflexión 0.000561 m

Con los datos se procede a calcular los términos de la ecuación de Rayleigh

$$\sum \omega_i y_i = 1486.15 \text{ N} \times 0.000561 \text{ m} + 1486.15 \text{ N} \times 0.000561 \text{ m} = 1.6675 \text{ Nm Ec.}$$

$$\sum \omega_i y_i^2 = 1486.15 \text{ N} \times 0.000561^2 \text{ m} + 1486.15 \text{ N} \times 0.000561^2 \text{ m} = 9.35 \times 10^{-4} \text{ Nm}^2 \text{ Ec.}$$

$$\omega_1 = \frac{\sqrt{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} (1.6675 \text{ Nm})}}{\sqrt{9.35 \times 10^{-4} \text{ Nm}^2}} = 132.2 \text{ r/s} \rightarrow \mathbf{1262.44 \text{ rpm Ec.}}$$

El rango de operación del eje es de 250 RPM a 336RPM es decir que la velocidad crítica no representa un problema para el diseño.

4.2.8 Selección de chumacera

El procedimiento para la selección de rodamientos es tomado del Mott. El primer paso es calcular la carga equivalente que soporta la chumacera. Cuando se aplica una carga radial R y la pista que gira es la interior la carga equivalente Pd es igual a la carga radial.

$$Pd = R \quad \text{Ec.17 Carga Equivalente}$$

La carga radial sobre los soportes se calcula mediante los diagramas de fuerza cortante obtenidos anteriormente con la expresión:

$$R = \sqrt{Vxz^2 + Vyz^2} \rightarrow R1 = \sqrt{487.2^2 + 1419.6^2} = 1500.87\text{N}; \text{ Ec.}$$

$$R2 = \sqrt{493.5^2 + 1438.2^2} = 1520.5\text{N} \quad \text{Ec.}$$

Los rodamientos están sometidos a carga radial pura, el tipo adecuado para la aplicación es de una hilera de bolas con ranura profunda. Posteriormente se debe especificar la duración de diseño, para maquinas industriales en general se recomienda L10 20000 a 30000 hr, como también es conocido la velocidad de giro del eje se puede determinar el número de revoluciones Ld para el diseño con la expresión:

$$Ld = hx (\text{rpm})x 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} = 30000x300x60 = 5,4x10^8 \text{rev} \quad \text{Ec.}$$

El diámetro mínimo del rodamiento es de 25.4 mm como se estableció en el diseño, la carga dinámica que debe soportar el rodamiento para que cumpla con la duración de diseño se determina mediante la expresión:

$$C = Pd \left(\frac{Ld}{10^6} \right)^{\frac{1}{k}} \quad k = 3 \text{ Para rodamientos de bolas entonces } C = 1520.5 \left(\frac{5,4x10^8}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 12381.8 \text{ N} \quad \text{Ec.}$$

Para determinar el ajuste del eje se utiliza un procedimiento del manual SKF de selección de rodamientos. Donde previamente se calcula el tipo de carga con la

inecuación $Pd \geq 0.06C$, esto equivale a una carga normal a elevada, a partir del diámetro nominal del eje 25.4 mm se recomienda un ajuste de apriete k5.

4.2.9 Diseño de los pernos sujetadores de la chumacera

El esfuerzo cortante puro en el perno se calcula con la expresión donde F es la fuerza cortante que se obtiene del diagrama de fuerza cortante del plano xy (1438.1 N) dividido entre dos pernos y A es el área del diámetro menor del tornillo. El tornillo específico para el tipo de chumacera es de un diámetro nominal 3/8” con un valor de $A=0.0678 \text{ pulg}^2$. Introduciendo estos valores en la fórmula se calcula el esfuerzo cortante.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{1438.2N}{43.7 \times 10^{-6} m^2} = 16.5 \text{ Mpa} \quad \text{Ec.18 Ecuacion de Esfuerzo Cortante}$$

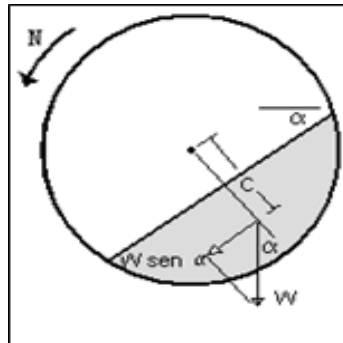
Para calcular el factor de seguridad se utiliza la teoría de esfuerzo cortante máximo donde S_y es el límite de esfuerzo de fluencia, para este caso se tomara como referencia AISI 304 con $S_y=204 \text{ Mpa}$.

$$\tau_{max} = \frac{S_y}{2N} \rightarrow N = \frac{310 \text{ Mpa}}{16.5 \text{ Mpa} \times 2} = 9.4 \text{ no falla Ec.}$$

4.2.10 Potencia Neta Molino

Para entender desarrollo apóyese figura 44

Figura 44. DCL del molino



Fuente: Elaboración propia con base a resultados arrojados por software de cálculo utilizados.

$$P_{neta} = C \cdot W \cdot \text{sen} \alpha \cdot N;$$

Ec.18 Potencia Neta

$$W = \rho_{ap} \cdot V_{trabajo}; \quad \text{Ec.}$$

$$C/D = 0.447 - 0.476J \quad \text{Ec.}$$

Donde P_{neta} es la potencia consumida por el molino en Kw, W es el peso de la carga del molino, C es la ubicación del centro de masa de la carga, D es el diámetro del contenedor, α Angulo inclinación superficie carga durante operación, J es la fracción del nivel de llenado del contenedor incluyendo los polvos y las esferas, ρ_{ap} (densidad aparente) es la razón entre peso total carga y volumen que ocupa.

Para la selección de la potencia del motor que impulsara al molino se utilizaran los valores más críticos de la ecuación. Se conoce que para un nivel de llenado del 50% es el que consume una mayor potencia, además para el valor de la velocidad critica el $\text{sen } \alpha$ tiene un valor máximo igual a uno. También se considerara que el polvo que ocupa la mitad del volumen del contenedor es carburo de tungsteno puro.

- Peso de los polvos

$$W = \rho_{wc} \times V_{trabajo} = 14.5 \text{ gr/cm}^3 \times 3181 \text{ cm}^3 = 46.1 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 451.78 \text{ N Ec.}$$

- Distancia del centro de masa

$$C = (0.447 - 0.476 \times 0.50) \times 0.18 \text{ m} = 0.0376 \text{ m Ec.}$$

- Velocidad critica $N_{cri} = 100 \text{ rpm} \times 2\pi/60 = 10.47 \text{ r/seg}$

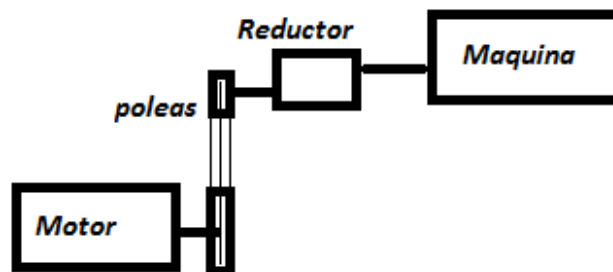
$$P_{neta} = 0.0376 \text{ m} \times 451.8 \text{ N} \times 10.47 \text{ r/seg} = 169.87 \text{ Watt Ec.}$$

Como se propone para el diseño utilizar dos contenedores con las mismas condiciones entonces $P = 2x P_{neta} = 339.7 \text{ W}$. Además se consideraran las posibles pérdidas entre los mecanismos de transmisión como poleas y rodamientos con un valor de 30% para ser conservadores y estar por encima de la potencia base, entonces la potencia final demandada del molino serán 442W equivalentes a **0.59 hp**. El valor nominal comercial más cercano es **0.75hp**. Seleccionado un motor de esta capacidad se garantiza que cumple con la demanda de la carga.

4.2.11 Diseño de la transmisión

Para reducir la velocidad del motor a la velocidad requerida por el eje, se plantea la utilización de un reductor de velocidad mecánico y una transmisión por correas como se muestra en el esquema de la figura. Para realizar esto se cuenta con un motor trifásico de una velocidad nominal de 3600 rpm y una velocidad de operación a plena carga de 3360 además de un reductor 30:1 como relación de velocidad.

Figura 45. Esquema de la transmisión.



Fuente: Elaboración propia con base diseño preliminar.

La velocidad de operación de los rodillos se calcula con la expresión deducida previamente:

$$\omega_1 \times r_1 = \omega_2 \times r_2 \rightarrow \omega_2 = \omega_1 r_1 / r_2 \quad \text{Ec.10 Calculo Velocidad angular}$$

Sustituyendo el valor de los radios del recipiente y el rodillo se obtiene

$$\omega_2 = \omega_1 105 \text{ mm} / 25 \text{ mm} = 4.2 \omega_1 \quad \text{Ec.}$$

También se conoce por el cálculo de la velocidad crítica los valores para ω_1 que están comprendidos entre 60 y 80 rpm. En la tabla se presentan los valores de velocidad angular del rodillo para distintas velocidades del recipiente.

| ω_1 rpm | ω_2 rpm |
|----------------|----------------|
| 60 | 252 |
| 70 | 294 |
| 80 | 336 |

Tabla del eje en función de la velocidad del contenedor

Previamente fue calculado el rango operativo de velocidad del eje que puede variar entre 252 a 336 rpm, para realizar el cálculo se tomara como referencia 336 rpm que representa el 80% de velocidad crítica del contenedor y es la velocidad recomendada por diferentes aplicaciones. Conocida la velocidad de salida del reductor se puede conocer la velocidad que debe entrar en él, con la expresión:

$$\frac{\omega_e}{\omega_s} = \frac{30}{1} \rightarrow \omega_e = 30\omega_s = 30 \times 336 \text{ rpm} = 10080 \text{ rpm} \quad \text{Ec.}$$

Ahora con la velocidad de operación del motor se calcula la relación de velocidad necesaria para la transmisión por correas con la expresión:

$$\frac{\omega_e}{\omega_m} = \frac{10080}{3360} = 3 \quad \text{Ec.}$$

Como primera iteración se utilizarán dos poleas con diámetros comerciales de 6" y 2" para evaluar si la velocidad de banda está entre el rango recomendado que va desde 1000 pie/min a 6500 pie/min, a través de la expresión:

$$vb = \frac{\pi D n}{12} = \frac{\pi \times 6 \times 3360}{12} = 5278 \text{ pie/min} \quad \text{Ec.19 Velocidad de Bandas}$$

La velocidad de banda de este diseño se encuentra entre los límites recomendados. El siguiente paso es calcular la potencia de diseño, que se determina multiplicando la potencia consumida por la máquina por un factor de servicio. Este factor para un motor AC de par torsional normal, impulsando un molino de bolas durante 6 a 15 horas al día equivale a 1.2, entonces la potencia de diseño es:

$$Pd = 1.2 \times 0.6 \text{ hp} = 0.72 \text{ hp} \quad \text{Ec.20 Potencia de Diseño}$$

Para la potencia de diseño y la velocidad de operación se recomienda la utilización de bandas en V de sección A ya que permite la transmisión de bajas potencias a altas velocidades. Para el cálculo de la longitud de la correa se asume una distancia entre centros de 12" ya que está en el intervalo recomendado $D \leq C \leq 3(d+D)$ y concuerda con las dimensiones de la mesa y el espacio donde será ubicado el sistema de poleas. Se utiliza la expresión:

$$L = 2C + 1.57(D + d) + \frac{(D-d)^2}{4C} \quad \text{Ec.21 Longitud de la Correa}$$

$$L = 2C + 1.57(D + d) + \frac{(D-d)^2}{4C} = 2 \times 18 + 1.57 \times (6 + 2) + \frac{(6-2)^2}{4 \times 18} = 36.89'' \text{ Ec.}$$

La longitud comercial más cercana es de 38", a partir de aquí se puede determinar la distancia entre centros con la ecuación que será regulada a través de una base que puede desplazarse verticalmente, donde se apoyará el motor para de esta manera lograr la distancia y tensión adecuada la expresión:

$$C = 0.25 \left\{ \left[L - \frac{\pi}{2}(D + d) \right] + \sqrt{\left[L - \frac{\pi}{2}(D + d) \right]^2 - 2(D - d)^2} \right\}$$

Sustituyendo se obtiene 12.55”

Ec.22 Distancia entre centros

Luego se determina el ángulo de contacto de la polea menor para obtener el factor de corrección con la expresión

$$\theta = 180 - 2 \sin^{-1} \frac{(D - d)}{2C} = 180 - 2 \sin^{-1} \frac{(6 - 2)}{2 \times 12.55} = 161.66^\circ$$

Ec.23 Angulo de Contacto en Poleas

Para este valor el valor de corrección por ángulo de contacto es K1=0.79, el factor de corrección de longitud para una banda A de 48” de longitud es K2=0.96. Con estos datos y el valor de potencias admitida por banda en condiciones estándar y suministrada por el fabricante (Pb=1 hp) se puede calcular el valor de potencia que admite la correa en las condiciones dadas.

$$Pa = K1K2Pb = 0.79 \times 0.96 \times 1 \text{ hp} = 0.758 \text{ hp}$$

Ec.24 Potencia de Contacto Admisible

Por lo tanto el número de bandas se determina con la expresión y se redondea al número entero superior más cercano. Para este diseño una banda es el mínimo requerido

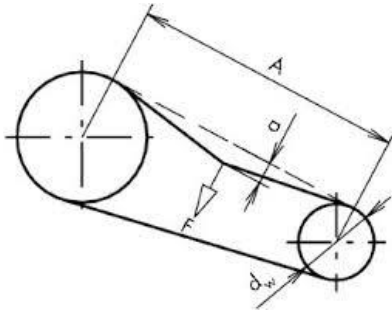
$$Nb = \frac{Pd}{Pa} = \frac{0.72}{0.76} = 0.94 \approx 1 \text{ Banda}$$

Ec.25 Número de Bandas Requerido

Otro factor importante a considerar en la tensión es las bandas, esto para evitar que se deslicen o sobrecarguen los rodamientos, para el cálculo adecuado de la tensión se utilizara la norma British Standard 3790. El procedimiento consiste en aplicar una fuerza en el centro del tramo largo de la banda como se muestra en la

figura, y que produzca una deflexión de 0.02 mm por cada milímetro del tramo.

Figura 46. tensión de la banda



Fuente: Manual de normas British Standar 3790 versión online. con dominio: <http://infostore.saiglobal.com/store/ICSBrowse.aspx?PublisherID=BSI>

La longitud A se calcula con la expresión:

$$A = C \left(1 - 0.125 \frac{[D-d]^2}{C} \right) = 12.55'' (1 - 0.1143) = 15.59'' = 396 \text{ mm}$$

Ec.26 Adecuación de tensión en base a distancia entre centros según norma British Standard 3790.

Para calcular la deflexión se multiplica el valor 0.02 por la longitud del tramo $0.02 \times 396 \text{ mm} = 7.9 \text{ mm}$, y la fuerza necesaria que se debe aplicar en el centro del tramo y que produzca dicha deflexión debe ser entre 10 a 16 Newton según las tablas de la norma. Existen diferentes dispositivos con resortes para medir esta fuerza con precisión. La tensión inicial puede ser un poco mayor al inicio de la operación ya que esta tiende a disminuir en las primeras horas de operación.

CAPITULO V

FABRICACION

5.1 CONSTRUCCION DEL MOLINO DE BOLAS

La construcción de la maquina se llevo a cabo periódicamente, siguiendo un algoritmo establecido por nosotros. La idea es llevar un orden que pueda simplificar el ensamblaje final una vez se tengan cada una de las partes que conforman el conjunto.

Pasos a seguir:

- Diseño computarizado del prototipo a construir, haciendo uso de una herramienta CAD. En nuestro caso SOLID EDGE.

- Construcción de la jarra o shell (recipiente contenedor).

-Procura de la materia prima necesaria. Dos tramos de tubería de acero AISI 1020 (dimensiones 300mm de largo, 170 mm de diámetro interno y 215mm de diámetro externo) destinado para las paredes del recipiente, 4 discos de acero AISI 1020 (226 mm de diámetro con 30mm de espesor) para las 4 tapas de las jarras y dos cilindros de acero dúplex (dimensiones 1050 de largo con 80mm de diámetro) para los rodillos.

-Torneado interno de los tramos de tubería para llevar la medida inicial de 215x170x300 a la especificada según planos de construcción 210x180x270.

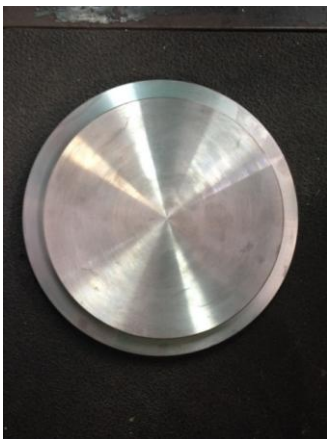
Figura 47. Torneado interno del contenedor



Fuente: Elaboración propia con base en a trabajo de campo año 2015

-Torneado de los discos de acero para llevar la medida de fábrica de 226x30 a la especificada según planos del CAD 180x12.7x12.7.

Figura 48. Vista frontal tapa de recipiente



Fuente: Elaboración propia con base en a trabajo de campo año 2015

-Torneado de las roscas para el encaje del recipiente con sus respectivas tapas (mecanismo de cierre de jarra/tapas).

Figura 49. Roscado interno



Figura 50. Contenedor ensamblado



Fuente: Elaboración propia con base en a trabajo de campo año 2015.

- Torneado de los rodillos



Figura 51. rodillos

- Construcción del banco soporte.

-Procura de los perfiles cuadrados para las patas soporte, la pancha base de la mesa y base del motor .

-Trazado y corte de la pancha mediante el uso del esmeril según especificaciones previas de diseño.

-Trazado y corte de los perfiles cuadrados mediante uso de esmeril según planos.

-Montaje y soldadura del soporte estructural del banco (únicamente perfiles).

-Montaje y fijación de la base del motor con mecanismo manual de nivelación

- Fijación de la pancha base a la estructura.

- Retoques de acabados con ayuda del esmeril y una piedra pulidora.

Figura 52 Banco soporte



- Construcción del sistema de transmisión

-Procura de todos los elementos que conforman el sistema (poleas ciegas de 2" 3" 5" 6" 7" , correas en tipo A, chumaceras , motor eléctrico de 3/4 hp a 1750 rpm y caja reductora de relación 30/1 con ángulo recto entre ejes de entrada y salida).

-Torneado del eje central de motor (muesca periférica para mayor efectividad de anclaje entre eje y poleas).

-Torneado y embobinado de las poleas de 2" 3" 5" 6"7" ciegas ajustándolas a las medidas pautadas por los ejes de motor y caja reductora respectivamente.

5.2 MONTAJE DEL EQUIPO

En principio, un molino de bolas de tambor rotatorio se basa en la molienda/mezclado uno o varios polvos por medio de un elemento (llámese jarra, contenedor o tambor) que descansa sobre un par de rodillo, uno de ellos motorizado; fijados a una estructura metálicas que hemos denominado banco soporte. El movimiento rotatorio fundamental se encuentra regido por un motor eléctrico acopado a una caja reductora por medio de un sistema de poleas y correas. De esta manera se logra obtener el giro deseado y necesario para una correcta mezcla dado un tiempo determinado.

Los pasos para el montaje del molino son dados a continuación:

-Se fija la estructura base del banco soporte, donde a su vez se instalara todo el sistema impulsor, sistema de transmisión y control el equipo.

-Se disponen cada una de las pastes que conforman el prototipo, tanto el motor, como la caja reductora, la swichera, chumaceras y ejes.

-Se colocan los pernos de sujeción.

-Se calzan las poleas asegurando las caras frontales de ambas se encuentren en el mismo plano evitando tensiones axiales en los ejes del motor y reductor asi como falsos contactos entre correa y poleas.

-Se procede a presentar la correa.

-Se varia la altura de la base del motor hasta lograr la tensión optima de la correa para un correcto funcionamiento.

-Se dispone la jarra sobre los rodillos , previamente cargada con los polvos metálicos y cuerpos demolidores y se procede con el encendido de la máquina para probar su funcionamiento.

Figura 53 ensamblado del molino



Figura 54 vista final de la maquina



5.3 PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

Para iniciar el arranque del equipo se debe tomar en cuenta los siguientes pasos señalados a continuación:

a) La disponibilidad eléctrica, que el equipo esté bien conectado, con los cables eléctricos y los contactores protegidos adecuadamente.

b) Se debe inspeccionar que estén operativos las poleas, tanto del motor así como el reductor, esto se debe evidenciar, haciendo girar manualmente y observando su disponibilidad.

c) Verificar la lubricación del sistema de transmisión del molino.

d) Verificar que el molino no contenga restos de material extraño, el molino debe estar totalmente limpio para evitar contaminación y no alterar los resultados.

e) Verificar que el equipo esté en buenas condiciones para su funcionamiento.

f) Agregar los medios de molienda al molino.

g) Agregar al molino la muestra de mineral a evaluar.

h) Colocar la tapa del molino y ajustar para evitar pérdidas.

i) Una vez inspeccionado y esta hábil para la operación se procede a dar la voz de arranque de molino, y todas las personas apartarse del equipo a una distancia prudencial.

j) Iniciar el arranque del equipo mediante el mando de control del equipo.

k) Parar el equipo mediante el mando de control después de terminado los tiempos establecidos de molienda.

l) Abrir la Tapa del molino, para realizar la descarga del molino y determinar los resultados metalúrgicos.

5.4.1 MANTENIMIENTO DE OPERACIÓN

Se debe considerar los siguientes pasos.

a) Revisar cableados y conexiones eléctricas.

b) Verificar que la tensión de la correa sea la adecuada para que funcionen bien las poleas.

c) Verificar que la correa esté en buen estado.

d) Revisar que la empacadura de la tapa este en perfectas condiciones.

e) Agregar la muestra y la carga molturante correcta.

f) Terminado la prueba dejar limpio el equipo.

5.4.2 MANTENIMIENTO DE LA MAQUINA.

Se debe establecer un programa de mantenimiento general del equipo, promoviendo la confiabilidad del equipo y extender su periodo de vida, de tal manera que garantice la continuidad y el óptimo funcionamiento del equipo, obteniéndose resultados confiables para la investigación metalúrgica.

5.4.3 MANTENIMIENTO DEL MOTOR

Un motor que ha sido instalado convenientemente exige muy pocas atenciones para mantenerlo en buenas condiciones, tan solo con conservarlo limpio, seco y engrasarlo periódicamente, prestara servicios sin averías por muchos años, la mayor parte de las averías se pueden deber al polvo, tierra, agua y aceite que se introducen en el motor y por ende en los bobinados.

Lo esencial en toda limpieza del motor es atender a todas las partes donde hay acumulación de impurezas.

Evitar el contacto con la humedad, agua, aceites, que podrían ingresar al motor y causar un cortocircuito provocando que se quemara el motor.

5.4.4 PLAN DE MANTENIMIENTO ANUAL PARA EL MOLINO DE BOLAS

a) Se determina el trabajo requerido mediante técnicas aplicadas para el diagnostico de la maquina, las cuales son de forma rápida y en ocasiones pueden realizarse algunas de ellas sin necesidad de detener el funcionamiento

Monitoreo del lubricante; el cual debe de ser el adecuado en rodamientos de la transmisión y reductor de velocidad.

-Detección de fugas.

-Detección de fisuras.

-Monitoreo de Vibración. Determinar si existe una vibración excesiva y los motivos de la misma, así como detectar si es causada por factores externos.

-Monitoreo del ruido. Ruido excesivo en la transmisión debido a un alineamiento erróneo entre los elementos móviles del equipo.

-Monitoreo de la corrosión. Mediante una inspección superficial de las placas que componen la carcasa del molino se determina la existencia de corrosión, así como la falta de pintura y abolladuras.

b) Una vez determinadas dichas fallas y su origen se debe de elaborar una lista de estas y de los elementos o materiales que se deben de sustituir para así posteriormente solicitar el material requerido para su compostura sustitución.

c) Se debe de elaborar una bitácora de las tareas a realizar y el tiempo requerido en un orden congruente y de manera que no afecte ni retrase el tiempo estimado de reparación.

d) Se inicia la reparación, haciendo el paro del molino y supervisando el trabajo realizado en el tiempo estimado, para evitar pérdidas en la producción.

5.5 SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL

El propósito de la seguridad e higiene industrial es desarrollar las actividades sin tener accidentes, daños o invalidez ocupacional, logrando esto en nuestra rápida expansión y cambios que sufre la tecnología.

El objetivo principal es que los alumnos tengan las mejores condiciones de salud y de cualquier riesgo ocasionados por maquinarias, equipos y por las condiciones de ambiente donde desarrollan sus actividades laborales.

Entre los principios fundamentales de la Seguridad e Higiene Industrial que determina el tipo de acciones que debe de adoptarse para la prevención de riesgos y enfermedades profesionales, tenemos lo siguiente:

- Los accidentes están determinados por las condiciones imperantes en el ambiente de trabajo y las actividades del estudiante.

- Los accidentes no son hechos imprevisibles ni producto del azar, tampoco deben considerarse como una fatalidad ineludible, ni inherentes a determinadas ocupaciones, más bien constituyen una cadena causal de hechos y circunstancias, los que de ser conocidos y analizados correctamente pueden prevenirse.

Por seguridad de la operación, se operara el equipo de acuerdo a un PETS (Procedimiento Escrito de Trabajo Seguro) de operación del equipo, garantizando la seguridad y confiabilidad de los resultados. El PETS se colocara en un lugar visible muy cerca del equipo.

CONCLUSIONES

Se diseñó y seleccionó todos los componentes del molino/mezclador, de tal forma que se pueda llevar a cabo su construcción, con materiales y tecnología existentes en el país. Se obtuvo información técnica pertinente acerca del proceso de mezclado de partículas de acuerdo a la información recopilada y la consulta con especialistas para producir aleación de interés científico e industrial. De esta manera se pudo establecer las especificaciones y parámetros de diseño del dispositivo.

Se realizaron los cálculos necesarios de las piezas y accesorios constitutivos del dispositivo, aplicando todos los conceptos y conocimientos adquiridos durante la formación en ingeniería mecánica, se utilizaron métodos analíticos y se acudió a la utilización de software CAD para realizar el diseño mecánico del equipo. Se seleccionaron materiales, partes comerciales y procesos de manufactura durante el diseño y construcción de la máquina.

Mediante pruebas de funcionamiento se calibró y colocó a punto el equipo, comprobando la rotación de los cilindros, velocidad de giro alcanzada por el motor, rodillos y jarras.

La consecución del molino de bolas permite fortalecer el área de materiales compuestos de la rama Ciencia e Ingeniería de materiales. El utilizar molinos de bolas es una técnica fácil y económica, comparada con otros métodos; además brinda la posibilidad de combinar materiales metálicos con no metálicos, abriendo así todo un horizonte para la investigación de nuevos materiales.

El equipo se caracterizó por su bajo costo de fabricación y consecución de componentes en el mercado local, lográndose así los objetivos planteados en este trabajo de tesis.

RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos y las dificultades encontradas durante la realización del presente trabajo, se generan las siguientes recomendaciones.

- Realizar estudio posteriores para optimizar los parámetros del mezclado (tiempo de mezclado, relación de peso de esferas/ peso de polvos, velocidad de giro, volumen de llenado del vial, diámetro de esferas, surfactante adecuado).
- Automatizar el proceso mediante implementación de temporizador y utilización de circuitos integrados o tarjetas programables.
- Implementación de un variador de frecuencia para mayor control y precisión sobre la velocidad de giro del molino.
- Instalación de niveladores del altura en los soportes de la mesa para asegurar estabilidad y evitar desplazamiento axial de las jarras.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ayala, J., (2006). Síntesis y Estructura de Nanotubos de BN+HF obtenidos por un proceso mecanico-termico. Trabajo Especial de Grado. Instituto de Investigación metalúrgica. Morelia. Méjico

Bakshi, S., Singh, V., Seal, S.,&Agarwal, A. (2009).Aluminium composite reinforced with multiwalled carbon nanotubes from plasma spraying of spray dried powders. *Surface&CoatingsTechnology*, 1544-1554.

Castillo, O., Muzziotti, J., (2014). Proyecto de Diseño Conceptual para el diseño de un dispositivo capaz de mezclar y moler polvos de carburo de tungsteno, nano tubos de carbono y cobalto dada una granulometría especifica. Caracas. Venezuela

Da Conceicao, M., Olivo, D. (2011). Evaluación de la resistencia al desgaste de recubrimientos WC-12%Co reforzados con nanotubos de carbono. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela

Esawi, A., Morsi, K., Sayed, A.,Taher, M., & Lanka, S. (2010).Effect of carbon nanotube (CNT) content on the mechanical properties of CNT-reinforced aluminum composites.*CompositesScience and Technology*.

Figueroa, A., Santoyo, J. (2013). Evaluación de las propiedades mecánicas y resistencia al desgaste de recubrimientos tipo cermet con nanotubos de carbono. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela

Gedler, G., Paredes, V., (2003). Evaluación del Comportamiento a la Fatiga y Fatiga corrosión de una aleación comercial de aluminio recubierta por termo rociado vía HVOF. Universidad central de Venezuela. Caracas. Venezeula.

Grueso M., Herrera Diego (2005). Diseño y construcción de un molino de bolas de alta energía y alta capacidad. Proyecto profesoral. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali. Colombia.

Groover, Mikell. “Fundamentos de Manufactura Moderna”. Editorial Prentice- Hall. México. 1997.

Hibbeler, R.C. “Mecánica de Materiales”. Editorial Prentice Hall. Tercera edición, México. 1998.

Mott, Robert L. “Diseño de Elementos de Máquinas”. Segunda Edición. Prentice – Hall Hispanoamericana. México, 1992.

Portocarrero, N., Pastor, C., (2010). Diseño, construcción y determinación de los parámetros de operación de un molino de bolas para el laboratorio metalúrgico de la escuela profesional de ingeniería química. Trabajo Especial de Grado. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa. Peru.

Reinteria J. (2008). Rediseño y construcción de un molino tipo atritor. trabajo especial de grado. Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali. Colombia

Ruiz E., da Costa C., López F. Torralba J.(2000) . Aleación mecánica: Método de obtención de polvos metálicos y de materiales compuestos. Rev. De Metalurgia Madrid 36 279-286

Suárez I., Gómez R., Pino I. (2011). Instalación experimental para la obtención de polvos de aluminio. Revista cubana de ingeniería.

Shi, X., Yang, H., Wang, S., Shao, G., & Duan, X. (2008). Fabrication and properties of WC-10Co cemented carbide reinforced by multi-walled carbon nanotubes. Materials Science and Engineering, 489-495.

Shigley, Joseph Edward y Charles Mischke. “Diseño en Ingeniería Mecánica”. Quinta Edición. Mc Graw – Hill. México. 2001.

Singh, V., Diaz, R., Balani, K., Agarwal, A., & Seal, S. (2009). Chromium carbide-CNT nanocomposites with enhanced mechanical properties. *Acta Materialia*, 335-344.

Zhang, F., Shen, J., & Sun, J. (2004). Processing and properties of carbon nanotubes-nano-WC-Co Composites. *Materials Science and Engineering*, 86-91.

ANEXOS
GUIA DE USO
DATOS TÉCNICOS Y FORMULAS PRATICAS

Dimensiones del recipiente

- **Diámetro interno 17,8 cm**
- **Diámetro externo 21 cm**
- **Longitud total 28 cm**
- **Longitud efectiva 22,86 cm**
- **Volumen interno 5.69 ltr**

Datos de operación

- **Velocidad critica 100 rpm rango recomendado (60%-80%)**
- **Volumen de llenado recomendado (30%-50%)**
- **Tabla de velocidad de rodillo en función de velocidad de recipientes**

| rpm molino | rpm rodillo |
|------------|-------------|
| 60 | 252 |
| 70 | 294 |
| 80 | 336 |

FORMULARIO

- **Velocidad critica**

$$n_c(\text{rpm}) = \frac{42.3}{\sqrt{D(\text{m})}} \quad n_c(\text{rpm}) = \frac{76.63}{\sqrt{D(\text{ft})}}$$

- volume del Molino

$$V_{\text{molino}} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4}$$

- volume de trabajo

$$V_{\text{trabajo}} = V_{\text{bolas}} + V_{\text{polvos}} + V_{\text{liquido}}$$

- Volumen de los polvos

$$V_{\text{polvos}} = x \frac{m}{\rho_a} + (1 - x) \frac{m}{\rho_b}$$

Donde x es el porcentaje en fracción del primer material, en peso, m la masa total, ρ_a la densidad del primer material y ρ_b la densidad del segundo material

- Volumen de las esferas

$$V_{\text{esferas}} = \frac{m \text{ bolas}}{\rho \text{ wc}}$$

- Volumen del líquido

$$V_{\text{liquido}} = x_{\text{liq}} \frac{m}{\rho_{\text{liq}}}$$

x_{liq} es la fracción en peso del liquido en la mezcla

- potencia neta del molino

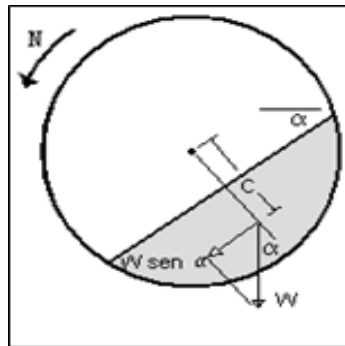


Imagen 55 potencia neta

$$P_{neta} = C \cdot W \operatorname{sen} \alpha \cdot N$$

$$W = \rho_{ap} \cdot V_{trabajo};$$

$$C/D = 0.447 - 0.476J$$

J es el nivel de llenado, ρ_{ap} densidad aparente de la mezcla

$$\rho_{ap} = \frac{\text{Masa total}}{V_{trabajo}}$$

- Diámetro máximo de cuerpos molturantes

$$D_b \text{ (in)} = \sqrt{\frac{F(\mu m)Wi}{K \cdot Cs(\%)} \sqrt{\frac{S(\frac{ton}{m^3})}{\sqrt{D \text{ ft}}}}}$$

Donde D_b es el diámetro máximo de las esferas, F es el tamaño de alimentación de los polvos en micrometros, Wi (Work Index) que es una constante función de la naturaleza del materia obtenido por tablas, K es una constante que vale 200 para molino de bolas, Cs es el porcentaje de la velocidad critica, S el peso especifico en toneladas por metro cubico del material a moler y D el diámetro del molino en pies

Imágenes de la fabricación

Imagen 56 tubo mecánico



Imagen 57 chumacera p205



Imagen 58 fabricación del recipiente



Imagen 59 Motor trifásico ¾ hp



Imagen 60 ensamblado de la mesa



Imagen 61 base del motor



Imagen 62 Reductor 30:1



Imagen 63 vista final de la maquina

