

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE SOLDADURA (CIS)

TRABAJO DE DIPLOMA

**PROCESAMIENTO ALUMINOTÉRMICO DE RESIDUOS
INDUSTRIALES PARA LA OBTENCIÓN DE GRANALLAS DE ACERO**

Autor: Yaresen Ferrera León

Tutor: Dr. Lorenzo Perdomo González

Curso: 2017–2018

Año: 5^{to} año

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830.

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamientos

“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica”

Aristóteles

“La preocupación por el hombre y su destino deben ser siempre el principal interés de cualquier esfuerzo técnico. Nunca lo olvide entre sus diagramas y ecuaciones”.

Albert Einstein

Agradecimientos

Quiero mostrar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que me han ayudado en la realización de este trabajo, en especial:

- A mis padres por todo su esfuerzo a lo largo de estos seis años, por su dedicación y confianza en mí.
- A mi tutor Dr. Lorenzo Perdomo González por dotarme de las herramientas necesarias para llevar a cabo una buena investigación.
- Quisiera que mis agradecimientos también fuesen para el Dr. Ángel Rafael García, por la dedicación que ha brindado a este trabajo y la orientación y apoyo prestado, sin los cuales este no se hubiese realizado. Gracias también por dedicar mucho de su tiempo de trabajo en mí.
- A toda mi familia por apoyarme, de una forma u otra, colaboraron con la realización de este proyecto tan importante para mí.
- A los profesores del Centro de Investigaciones de Soldadura por dedicarme tiempo y comprensión en el transcurso de mi trabajo.
- A los trabajadores del Centro Alexis Delgado Gómez y Misael Rodríguez Palmero que me brindaron su ayuda incondicionalmente.
- A mis amigos de ingeniería industrial por sus apoyos brindados.
- A mi familia una vez más, por darme ánimos en todo momento a seguir adelante y por ayudarme a no decaer en los momentos de desánimo.

A todos muchas gracias

Resumen

En el presente trabajo se estudia la obtención de granallas de hierro a partir del procesamiento aluminotérmico de residuales industriales, por lo que se diseña y construye un agitador que ayuda a la granulación del metal fundido en agua. En el trabajo se evalúan dos formulaciones, una integrada por cascarilla de laminación, aluminio y carbono y la otra por estos mismos componentes más escorias de soldadura. Como resultados del trabajo se obtiene una aleación de hierro, la que es vertida en agua obteniéndose granallas de acero, las que son trituradas y clasificadas granulométricamente. Como resultado del proceso se logra verter del crisol más del 79 % del metal teórico a producir, quedando en el crisol más del 70 % del potencial de escoria.

Summary

In the present work, the production of iron shots from the aluminothermic processing of industrial waste is studied, for which purpose an agitator is designed and built to aid in the granulation of the molten metal in water. In the work, two formulations are evaluated, one consisting of lamination scale, aluminum and carbon and the other for these same components plus welding slags. As a result of the work an iron alloy is obtained, which is poured into water obtaining steel shots, which are crushed and classified granulometrically. As a result of the process, more than 79% of the theoretical metal to be produced is discharged from the crucible, with more than 70% of the slag potential remaining in the crucible.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo I. Marco teórico.....	4
1.1 El aluminio. Características físicas.....	4
1.1.2 Características mecánicas.....	4
1.1.3 Características químicas.....	4
1.1.4 Aplicaciones y usos del aluminio.....	4
1.2 Óxidos de hierro. Características generales.....	5
1.2.1 La hematita.....	6
1.2.2 La magnetita.....	6
1.2.3 La wustita.....	8
1.2.4 Cascarillas de laminación.....	8
1.2.5 Termita (mezcla reactante).....	9
1.3 Agitación y mezclado.....	11
1.3.1 Tipos de agitadores.....	12
1.3.2 Granallas. Tipos, características y aplicaciones.....	13
1.3.3 Obtención.....	15
Capítulo 2: Materiales y métodos.....	16
2.1 Diseño y fabricación de un agitador mecánico para la granulación y obtención de las granallas de acero.....	16
2.2 Impulsores o agitadores.....	17
2.3 Diseño del dispositivo agitador para la granulación de las aleaciones.....	19
2.3.1 Cálculo del número de Reynolds para el agitador mecánico.....	21
2.3.2 Cálculo de las fuerzas a las que está sometido el agitador mecánico.....	22
-Cálculo de la fuerza de arrastre en los álabes del agitador.....	23
-Cálculo de la fuerza de sustentación en los álabes del agitador.....	24
2.3.3 Cálculo de la potencia consumida por el agitador.....	25
2.3.4 Diseño de la transmisión flexible para el movimiento del agitador.....	25
2.3.5 Diseño de la flecha y demás componentes del agitador mecánico.....	31
2.4 Evaluación del sistema de granulación.....	33
2.4.1 Materias Primas. Características.....	33
2.4.2 Preparación de las materias primas.....	34

2.4.3 Mezclas a ensayar	35
Capítulo III Análisis de resultados	37
3.1 Análisis de los resultados obtenidos en el diseño del agitador mecánico....	37
3.2 Resultados del procesamiento metalúrgico y granulación	38
3.2.1 Carga Patrón + carbono (carga I). Primera colada	40
3.2.2 Carga con carbón y escoria (carga II). Segunda colada	45
3.2.3 Carga Patrón + carbono (carga I). Tercera colada	47
3.2.4 Carga Patrón + carbono (carga I). Cuarta colada	48
3.2.5 Carga Patrón + carbono (carga I). Quinta colada	50
Conclusiones	53
Recomendaciones.....	54
Referencias Bibliográficas	55
Anexos	58

Introducción

Los residuos industriales son desechos producidos por la actividad industrial, los cuales pueden ser en algunos casos aprovechados para determinadas aplicaciones. Gran cantidad de estos residuos pueden ser reciclados, pero el problema es que las técnicas que se emplean son sumamente costosas. Los residuos se pueden clasificar en inertes y peligrosos, y muchos de ellos constituyen un riesgo tanto para la humanidad como para el medio ambiente. En nuestro país, se generan miles de toneladas de residuales en fábricas, las cuales aumentan el nivel de contaminación ambiental. Uno de estos residuos es la cascarilla producida durante la laminación de acero en las empresas siderúrgicas Antillana de Acero de Ciudad de La Habana y Acinox Tunas de Las Tunas, la cual tiene muy poco empleo en nuestro país (Gonzales et al., 2006).

Las virutas de aluminio constituyen otro residual, las que son generadas por las empresas productoras de marqueterías, maquinado y conformados de aluminio, producciones que cobran cada vez más auge en Cuba. Una de estas es la Fábrica de Antenas de la Ciudad de Santa Clara. Este residuo es reciclado en el país por la empresa de Recuperación de Materias Primas, por tanto, en realidad no constituye un contaminante del medio ambiente. Otro desecho industrial, sin una aplicación específica, son las escorias que se generan durante la soldadura automática por arco sumergido (SAW) (González, 2016).

La aluminotermia fue descubierta en 1893 y patentada el 13 de marzo de 1895 por el químico alemán, el doctor Hans Goldschmidt. El profesor Goldschmidt había conseguido hacer aplicable de manera técnica la reducción de óxidos de metal con polvo de aluminio. La aluminotermia se utiliza generalmente para la obtención de metales y para la realización de soldaduras como es el caso de la soldadura de carriles. En el proceso aluminotérmico, ocurren reacciones químicas, las cuales desprenden calor (reacciones exotérmicas), estas son capaces de suministrar la energía calorífica necesaria para su mantenimiento, reduciéndose de esta manera los costos de producción de estos materiales; siendo factible, en este proceso, la utilización de compuestos minerales y de residuales industriales (Castells, 2012)

La producción de materias primas a partir del uso de minerales cubanos y el reciclaje de desechos industriales puede contribuir a la sustitución de importaciones, ya que a

través de procesos metalúrgicos como la aluminotermia se obtienen aleaciones metálicas y escorias las cuales poseen características especiales, siendo factible su utilización en otros procesos industriales lo que puede constituir un paso de avance en la economía de nuestro país. El aprovechamiento de estos residuales representa un aporte al cuidado del medio ambiente (González, 2016).

Problema práctico

La industria metal mecánica de Cuba importa grandes niveles de granallas metálicas para los procesos de tratamiento de superficies, lo cual incrementa los costos de producción de las piezas producidas.

Problema científico

Estudiar un procedimiento que permita realizar la granulación de una aleación de hierro obtenida mediante aluminotermia.

Hipótesis

Si se realiza el vertido en agua de una aleación, obtenida a partir de cascarilla de laminación mediante aluminotermia, se obtendrá una granalla metálica donde la distribución granulométrica va a depender de las características del proceso de vertido.

Objetivo general

Evaluar el procesamiento aluminotérmico de cascarillas de laminación y grafito, para la obtención de granallas de acero con la ayuda de un agitador mecánico.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir un agitador mecánico que facilite la granulación de metal en agua.
- Estudiar el comportamiento de formulaciones de mezclas aluminotérmicas durante el proceso de granulación en agua.
- Realizar la evaluación del proceso de granulación.

Tareas a desarrollar

- Revisión bibliográfica sobre los residuales industriales y parámetros de diseño de un tanque agitador.
- Diseñar la instalación para la granulación de las aleaciones.
- Preparación de las materias primas.
- Formulación de las mezclas pirometalúrgicas y procesamiento aluminotérmico.
- Evaluación de las aleaciones obtenidas.

Capítulo I. Marco teórico

En este capítulo se exponen los fundamentos teóricos esenciales para la obtención de metales mediante el proceso de aluminotermia y su posterior granulación.

1.1 El aluminio. Características físicas

El aluminio es un elemento muy abundante en la naturaleza, solo aventajado por el oxígeno y el silicio. Es un metal ligero, con una densidad de 2700 kg/m^3 , y con un bajo punto de fusión ($660 \text{ }^\circ\text{C}$). Su color es blanco y refleja bien la radiación electromagnética del espectro visible y el térmico. Es buen conductor eléctrico [entre 35 y $38 \text{ m} / (\Omega \cdot \text{mm}^2)$] y térmico (80 a $230 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] (Gualda Contreras, 2012).

1.1.2 Características mecánicas

Es un material blando y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de $160\text{-}200 \text{ N/mm}^2$ ($160\text{-}200 \text{ MPa}$). Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. También de esta forma se utiliza como soldadura (Hufnagel, 1992).

1.1.3 Características químicas

La capa de valencia del aluminio está poblada por tres electrones, por lo que su estado normal de oxidación es III. Esto hace que reaccione con el oxígeno de la atmósfera formando con rapidez una fina capa gris mate de alúmina Al_2O_3 , que recubre el material, aislándolo de la ulterior corrosión. Esta capa puede disolverse con ácido cítrico. A pesar de ello es tan estable que se usa con frecuencia para extraer otros metales de sus óxidos. Por lo demás, el aluminio se disuelve en ácidos y bases. Reaccionan con facilidad con el ácido clorhídrico y el hidróxido sódico (Hufnagel, 1992).

1.1.4 Aplicaciones y usos del aluminio

La utilización industrial del aluminio lo ha hecho uno de los metales más importantes, tanto en cantidad como en variedad de usos, siendo hoy un material polivalente que se aplica en ámbitos económicos muy diversos y que resulta estratégico en situaciones de conflicto. Hoy en día, solo superado por el acero. El aluminio se usa en forma pura, aleado

con otros metales o en compuestos no metálicos. En estado puro se aprovechan sus propiedades ópticas para fabricar espejos domésticos e industriales, como pueden ser los de los telescopios reflectores. Su uso más popular, sin embargo, es como papel aluminio, que consiste en láminas de material con un espesor tan pequeño que resulta fácilmente maleable y apto por tanto para embalaje alimentario. También se usa en la fabricación de envases (Wales and Sanger, 2001).

Por sus propiedades eléctricas es un buen conductor, capaz de competir en costo y prestaciones con el cobre tradicional. Dado que, a igual longitud y masa, el conductor de aluminio tiene poca menos conductividad, resulta un componente útil para utilidades donde el exceso de peso es importante. Es el caso de la aeronáutica y de los tendidos eléctricos donde el menor peso implica en un caso menos gasto de combustible y mayor autonomía, y en el otro la posibilidad de separar las torres de alta tensión. Además de esto, aleado con otros metales, se utiliza para la creación de estructuras portantes en la arquitectura y para fabricar piezas industriales de todo tipo de vehículos y calderería. También está presente en enseres domésticos tales como utensilios de cocina y herramientas. Se utiliza asimismo en la soldadura aluminotérmica y como combustible químico y explosivo por su alta reactividad. Como presenta un buen comportamiento a bajas temperaturas, se utiliza para fabricar contenedores criogénicos. Cuanto más puro, será más liviano y en algunas piezas de aviación, tendrá una alta resistencia gracias al oxígeno que lo compone. Es conocido como "Aluminio oxigenado o Aero Aluminio" (Wales and Sanger, 2001).

1.2 Óxidos de hierro. Características generales

El hierro, como metal de transición que es, tiene la capacidad de formar diversos compuestos oxidados, algunos de los cuales han sido usados por la humanidad desde tiempos muy lejanos como los pigmentos utilizados en las pinturas rupestres de las cuevas de Altamira, en la Península Ibérica. Estos compuestos presentan una variada gama de colores que va desde el mineral prácticamente blanco (akaganéita), hasta el negro intenso (magnetita), pasando por diversas tonalidades naranjas (lepidocrocita), rojos (hematita), marrones (goethita) y verdes (wustita). Se presentan como óxidos, hidróxidos u oxihidróxidos con o sin agua de hidratación y en estado ferroso o férrico, con

propiedades físicas también bastante variadas, como aislantes, semiconductores y conductores; antiferromagnéticas, paramagnéticas o ferrimagnéticas; todo ello asociado a las diferentes formas de cristalización, que incluyen el amorfismo de la limonita y el hexagonal desordenado de la ferroxihíta, como también el ordenamiento ortorrómbico de goethita y lepidocrocita y el cúbico de espinela invertida de la magnetita y de la maghemita (Wales and Sanger, 2001).

1.2.1 La hematita

La hematita, conocida también como óxido de hierro (III), especularita u oligisto, cuya fórmula química es Fe_2O_3 , tiene una masa de 70 % Fe y 30 % O; es trigonal, del tipo del Al_2O_3 , con parámetros de red $a_0 = 5,038 \text{ \AA}$ y $c_0 = 12,272 \text{ \AA}$. Es paramagnética y aislante eléctrica, y las partículas tienen forma de plaquetas hexagonales u octogonales, variando su color de marrón rojizo (rojo sangre) a negra. Se halla en depósitos independientes a veces de gran espesor y extensión, como mineral asociado en rocas ígneas, como inclusión en muchos minerales, en forma de producto de sublimación de lavas o como resultado de metamorfismo de contacto, y por alteración de siderita o magnetita. Por hidratación se transforma en limonita (Pérez et al., 2003).

El uso de la hematita como pigmento en pinturas y barnices se encuentra muy extendido, debido a su buena resistencia a la acción de ácidos y bases. Es un buen protector para interiores, exteriores y piezas metálicas. Resiste la acción del calor y los rayos ultravioleta y tiene la ventaja de los bajos costos en la obtención de la materia prima y de su procesamiento. Para obtener diferentes gamas de color se mezcla con sílice, alúmina y óxido de calcio. Los pigmentos de mejor calidad tienen un elevado contenido de partículas laminares. La acción protectora está asociada al empaquetamiento de las laminillas en la película de pintura, formando capas traslapadas. Esta distribución retrasa la penetración de la humedad y de las sustancias corrosivas como los iones cloruro y sulfato (Wales and Sanger, 2001).

1.2.2 La magnetita

La magnetita, de fórmula Fe_3O_4 , se conoce como tetróxido de trihierro u óxido ferroso férrico y su color es negro. Es cúbica, con parámetro $a_0 = 8,3963 \text{ \AA}$, ferrimagnética y semiconductor. El oxígeno forma la red cúbica de caras centradas, deja 32 espacios

octaédricos y 64 tetraédricos; los octaédricos están ocupados por Fe^{2+} y Fe^{3+} , y los tetraédricos por Fe^{3+} . El hierro supone el 72,4 % y el oxígeno el 27,6 % en masa. A temperatura elevada puede cambiar ligeramente debido a que la red puede aceptar un exceso de iones trivalentes. Los iones ferrosos y férricos de las posiciones octaédricas comparten los electrones de valencia, lo que permite que sea un compuesto frecuentemente no estequiométrico y de elevada conductividad eléctrica. Se encuentra diseminada como mineral asociado a la mayoría de las rocas ígneas. Comúnmente está asociada a rocas metamórficas cristalinas formadas al abrigo del aire. Se encuentra como una placa fina o dendrita entre placas de mica, y es uno de los constituyentes de las arenas de los ríos, lagos y mares. Se altera pasando a limonita o hematita, teniendo como intermediaria a la maghemita, debido a la semejanza en la estructura cristalina (Wales and Sanger, 2001).

La magnetita es ampliamente utilizada como pigmento para pinturas, linóleo y en la industria textil. Además, existen estudios que demuestran que la incorporación de óxidos de hierro en la fabricación de vidrios con borosilicato de sodio tiene efectos favorables, pues la adición de magnetita incrementa notablemente la resistencia al agua, debido a que se forma una mezcla Fe-Si-O que incrementa las propiedades protectoras de las capas superficiales. Se utiliza como colorante en la producción de vidrios opacos y semiopacos, en los cuales produce las tonalidades verdes, azul claro y negro. Por sus características abrasivas, es utilizada como compuesto para pulir, mientras que por sus propiedades magnéticas se emplea en la fabricación de imanes permanentes. Además, se utiliza como partículas ultrafinas en algunos dispositivos para grabaciones magnéticas y almacenamiento de datos. Para obtener partículas con características morfológicas y magnéticas apropiadas para grabación de alta densidad, se mezclan magnetita y maghemita obtenidas a partir de precursores oxálicos y el producto se dopa con cobalto y boro. La magnetita, junto con la hematita, son los óxidos de hierro más utilizados como catalizadores, siendo considerada como un excelente catalizador (Wales and Sanger, 2001).

1.2.3 La wustita

La wustita es un mineral de la clase de los minerales óxidos, y dentro de esta pertenece al llamado “grupo de la periclasa”. Fue descubierta en 1924 cerca de Stuttgart (Alemania), siendo nombrada así en honor de Ewald Wüst, geólogo alemán. Sinónimos poco usados son: wüstita, wuestita, iozita o iosiderita. Es un óxido simple de hierro, muy similar a los del grupo de la periclasa al que pertenece. El hábito es de costras rellenando el espacio entre granos, reemplazando a otros minerales; también puede tener un hábito masivo, como componente de microesférulas huecas y conteniendo trozos de hierro o magnetita. Se forma como un producto de la alteración de otros minerales del hierro a altas temperaturas en un ambiente altamente reductor, así como en basaltos con hierro en ambiente reductor. También se ha encontrado como inclusiones en diamantes de rocas kimberlitas; en precipitados de salmueras del fondo marino y en nódulos de manganeso-hierro (GIL et al., 2008).

También se ha encontrado en el interior de algunos meteoritos, así como en microesférulas de origen posiblemente extraterrestre encontradas en gran variedad de ambientes geológicos. Suele encontrarse asociado a otros minerales como: hierro nativo, hematita, magnetita, goethita, akaganeita, lepidocrocita, ilmenita, maghemita, troilita, pirrotita o piritita (Wales and Sanger, 2001).

1.2.4 Cascarillas de laminación

La cascarilla es un subproducto siderúrgico que procede del tren de laminación del proceso de laminación en caliente del acero. En la cascarilla están presentes, además de hierro en forma elemental, tres tipos de óxidos de hierro: wustita (FeO), hematita (Fe_2O_3) y magnetita (Fe_3O_4). La composición química de la cascarilla varía en función del tipo de acero a producir y del proceso empleado. El contenido de hierro es normalmente de un 70,0 % y contiene trazas de metales no férricos y compuestos alcalinos. La cascarilla está contaminada con restos de lubricantes, otros aceites y grasas procedentes de derrames de los equipos asociados a las operaciones de laminación. El contenido en aceites suele variar entre un 0,1 y un 2,0 %, pudiendo llegar hasta un 10,0 %. La cascarilla está formada por partículas de naturaleza escamosa, con un tamaño de partícula generalmente menor de 5,0 mm. La distribución de tamaño depende del punto del proceso en el que se genere.

Las partículas más pequeñas de la cascarilla (tamaño de partícula $<0,1$ mm), denominadas lodo de cascarilla, se recogen generalmente en las unidades de tratamiento del agua de proceso localizadas cerca de los laminadores. Dependiendo del proceso y de la naturaleza del producto, el peso de cascarilla puede variar de 20 a 50 kg/t de producto laminado en caliente. Una media típica de la producción específica de este residuo es de 35 - 40 kg/t. En España se generan alrededor de 44000 toneladas/año de cascarilla (Castelló et al., 2010).

En función de su tamaño y del contenido en aceites la cascarilla puede o no ser reciclada vía sínter. En líneas generales, se considera reutilizable al sínter sin pretratamiento la cascarilla gruesa, con tamaño de partícula entre 0,5 y 5 mm y un contenido en aceites menor del 1,0%. La cascarilla con un contenido en aceites mayor del 3,0% debe de ser tratada previamente, ya que este contenido de aceites puede producir incremento de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y dioxinas y problemas en los sistemas de purificación de gases residuales. La cascarilla más fina contaminada en aceites en más de un 5% acaba como residuo en el vertedero (Castelló et al., 2010).

En Cuba se generan anualmente miles de toneladas de residuales en las industrias, las cuales contribuyen a elevar el nivel de contaminación ambiental. Entre otros ejemplos se pueden citar, las cascarillas producidas durante la laminación del acero en las empresas siderúrgicas Antillana de Acero de Ciudad de La Habana y Acinox de la provincia Las Tunas (Gómez Ríos, 2015).

1.2.5 Termita (mezcla reactante)

Termita es un tipo de composición pirotécnica de aluminio y un óxido metálico, el cual produce una reacción aluminotérmica conocida como reacción de la termita. El aluminio es oxidado por el óxido de otro metal, comúnmente por óxido de hierro (herrumbre). Los productos de la reacción química son: óxido de aluminio + hierro elemental libre y una gran cantidad de calor (Rodríguez-González et al., 2018).

La reacción de la termita es usada para la soldadura aluminotérmica frecuentemente utilizada para unir rieles ferroviarios. Se pueden usar algunos otros óxidos metálicos, tales como óxido de cromo, para generar metal elemental. La termita cúprica se produce usando óxido de cobre (II) y es usada para crear uniones eléctricas en un proceso llamado

"cadwelding". Algunas mezclas parecidas a la termita son usadas como iniciadores pirotécnicos como en los fuegos artificiales (Rodríguez-González et al., 2018).

El aluminio tiene gran afinidad por el oxígeno, visto esto a través del relativo alto calor de formación de su óxido (-399,09 kcal/mol), según datos reportados por (Perry y Green, 1999) lo que permite que en una gran cantidad de casos puedan desarrollarse reacciones químicas de oxidación-reducción en relaciones estequiométricas, sin la necesidad de suministrar energía adicional una vez que la reacción es iniciada. En los procesos pirometalúrgicos estas reacciones son fuertemente exotérmicas, presentando una relativa alta velocidad de reacción que, en ocasiones, llega a ser explosiva, lo que trae como resultado un metal y una escoria, esta última constituida fundamentalmente por óxido de aluminio. Este proceso ha sido denominado aluminotermia. La ecuación química general que representa el proceso aluminotérmico es:



Donde: **M** representa el metal del óxido a reducir **M_xO_y**.

Por su importancia práctica, esta reacción exotérmica ($\Delta G^\circ < 0$, $\Delta H^\circ < 0$) ha sido utilizada como un criterio estratégico en la obtención de metales y aleaciones metálicas, en la síntesis de materiales, como fuente de calor y de metal de aporte en soldadura, entre otros. Debido al carácter casi lineal de la variación de energía libre de Gibbs, siempre y cuando no haya transformaciones de fase ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S = f(T, \text{ en K})$) de las reacciones de oxidación reducción de diferentes metales en determinados rangos de temperatura, se toma la posición relativa entre estas rectas en el diagrama de Ellingham (Figura 1.6).(González, 2016)

Un **diagrama de Ellingham** es un diagrama que muestra la dependencia de la estabilidad de los compuestos con la temperatura. Este análisis se utiliza generalmente para evaluar la facilidad de reducción de óxidos y sulfuros de metales. Estos diagramas fueron contruidos por primera vez por Harold Ellingham en 1944. En metalurgia, los diagramas de Ellingham se utilizan para predecir la temperatura de equilibrio entre un metal, su óxido y el oxígeno, y, por extensión, las reacciones de un metal con azufre, nitrógeno, y otros elementos no metálicos. Los diagramas son útiles para predecir las condiciones en las que un mineral metálico será reducido al metal (Ellingham, 1944).

En la Figura 1.1 se muestra un diagrama de Ellingham

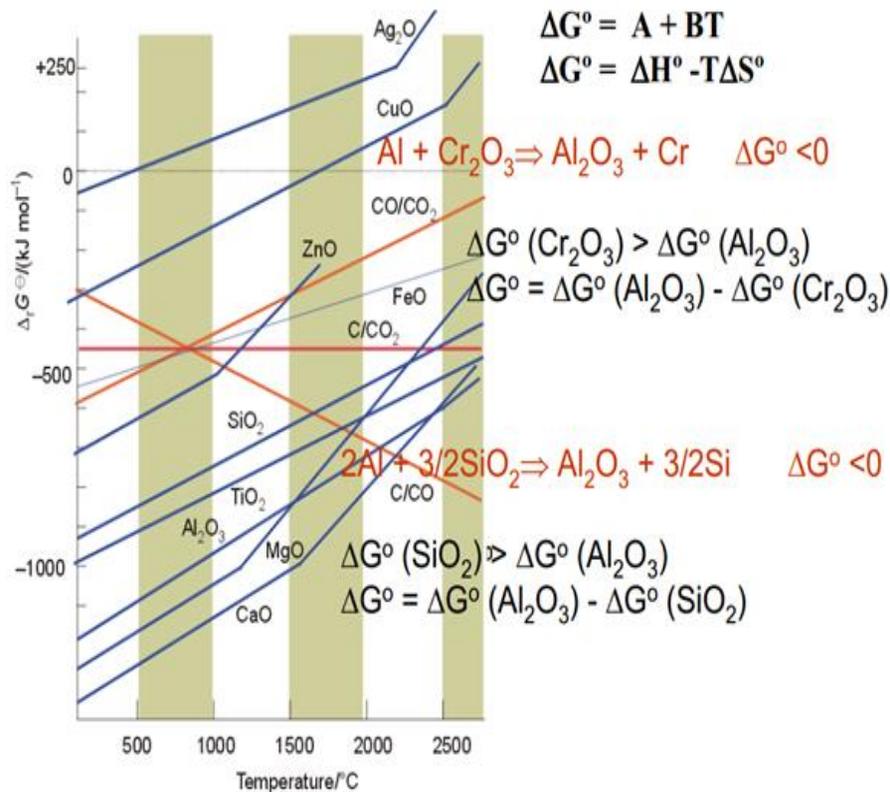


Figura 1.1 Diagrama de Ellingham para diferentes óxidos (McCann, 2010).

1.3 Agitación y mezclado

El mezclado es una operación unitaria en la cual se logra una combinación uniforme de dos o más componentes. En adición a la mezcla de componentes la operación de mezclado conlleva otros cambios deseables en los materiales, tales como la promoción de la transferencia de calor, facilitar reacciones químicas o biológicas, el trabajo mecánico (Brennan, 2006).

La agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente (Geankoplis, 2006).

En la figura 1.2 se muestra un tanque agitador, donde puede observarse el movimiento del fluido en el interior del recipiente. Esta turbulencia en el interior del tanque debe favorecer la granulación del metal fundido cuando cae en el agua.

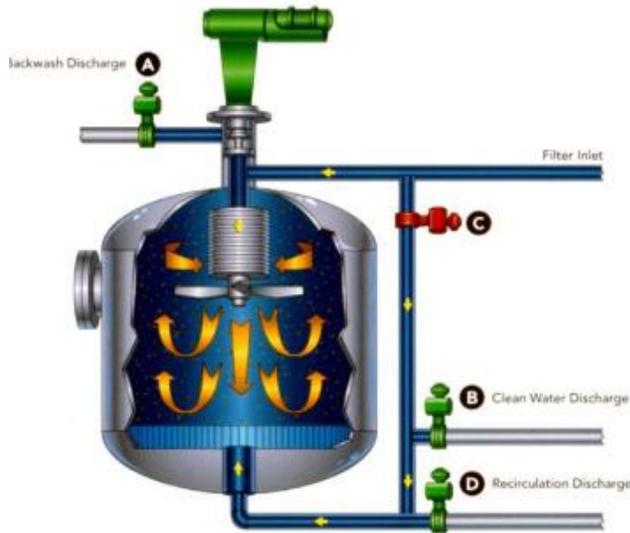


Figura 1.2 Tanque agitador (UCI, 2016)

1.3.1 Tipos de agitadores

Los aparatos mecánicos pueden ser *activos*, los cuales mezclan a través de la entrada externa de energía hacia una hélice con alabes o aparatos *pasivos* en los cuales se diseña la geometría del recipiente para que haya trayectorias irregulares del flujo y, por lo tanto, se aumenta la mezcla. La figura 1.3 contiene aparatos activos que constan de *pantallas* internas. Los aparatos basados en pantallas sirven para aumentar los tiempos de detención y por consiguiente tienen una función dual (Streeter et al., 1998).

En la figura 1.3 los agitadores de *paletas* (1 y 2) se utilizan en instalaciones de baja velocidad y, por lo general, tienen incrementos de números pares de paletas (2, 4, etc.). A mayores velocidades de rotación se desarrollan desbalances y se requiere un número impar de álabes (3, 5, etc.). Estos álabes o paletas se diseñan para ocupar del 60 al 70% del ancho del recipiente con cada paleta del orden de 1/8 a 1/10 de la longitud del tanque. Las pantallas de pared se utilizan para velocidades un poco más altas. El agitador de paletas no crea ningún flujo vertical y por consiguiente es un mezclador pobre, pero sí provee el alto esfuerzo cortante necesario para mantener las partículas en suspensión. Ejemplos típicos de orígenes no industriales incluyen los mezcladores de pintura domésticos que se unen a taladros eléctricos o los mezcladores eléctricos caseros para la masa de pasteles y de panadería. El agitador de *hélice o turbina* gira a

tasas de velocidad más altas. El agitador de turbina usualmente se refiere a un sistema de paletas operando a revoluciones por minuto (rpm) más altas. Un ejemplo doméstico típico en el hogar es el ventilador de techo que produce flujo de calor en el invierno operándolo en el modo hacia abajo para mezclar el aire caliente atrapado en el techo o produce una distribución uniforme de aire frío en el verano operándolo en el modo hacia arriba para mezclar el aire frío atrapado cerca de piso (Streeter et al., 1998).

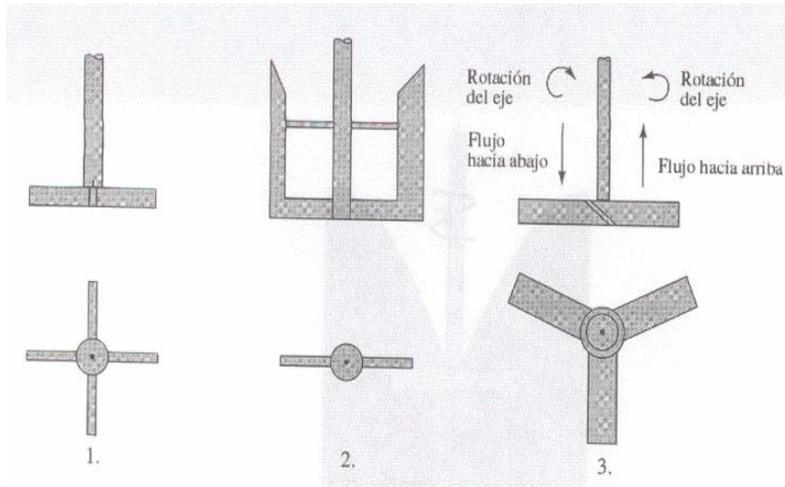


Figura 1.3 Algunas configuraciones de aparatos mezcladores activos (Streeter, 1999).

1.3.2 Granallas. Tipos, características y aplicaciones

Las granallas de acero, como ilustra la figura 1.4 son abrasivos utilizados en numerosas aplicaciones como el tratamiento de superficies por granallado y el aserrado de bloques de granito. Se obtiene del acero a través de procesos de fusión con composiciones químicas controladas. Del proceso primario de fabricación se obtienen partículas redondeadas que constituyen las granallas de acero esféricas (shot), las partículas de mayor diámetro se parten formando así la granalla de acero angular (grit) (Forn, 2018).



Figura 1.4 Granallas de acero esféricas y angulares (Abrasivos, 2000).

Para aquellos trabajos en donde reemplazan el uso de la arena, se utilizan exclusivamente granallas angulares, en algunos casos con el agregado de un pequeño porcentaje de granalla esférica. Una partícula de granalla angular presenta aristas y puntas y al ser proyectada trabaja como una herramienta que clava y arrastra en la superficie a procesar. Las granallas de acero cumplen con los requisitos en ciertos trabajos muy específicos y puntuales. (Forn, 2018).

El principal uso de la granalla de acero al carbono es la limpieza de piezas de fundición y troquelado ya que la arena que procede del proceso de fabricación, mediante la fundición, se adhiere con fuerza a la pieza producida y es difícil de desprender ya que queda compactada en la superficie de las piezas, o las irregularidades en los bordes del troquelado. El granallado con granalla de acero al carbono sugiere una forma rápida y barata en la relación costo-beneficio con respecto a la antigua forma manual con cardas y/o esmeriles para darle mejor apariencia y acabado a las piezas (Forn, 2018).

Este abrasivo, puede ser seleccionado de acuerdo al trabajo a realizar, no solo por el tamaño de partícula, uniforme en todas ellas, sino la dureza en determinados rangos. Es altamente reciclable, pudiendo ser proyectado desde 700 a 5 000 veces conforme al diámetro, tipo y dureza de abrasivo utilizado. Al ser partículas de acero templado y revenido no provocan problema de contaminación en la superficie de trabajo (González, 2016).

También se utiliza para la preparación superficial de grandes y pequeñas superficies de acero y diferentes superficies como pueden ser concreto, asfalto, hierro, etc. de más de 10 mm de espesor en talleres de calderería; la granalla se aplica a presión sobre las

piezas eliminando el óxido y otras imperfecciones del laminado, dejando el material listo para proceder a su pintado (proceso de granallado).

La proyección se realiza en cabinas cerradas que permiten su reutilización. Cuando ya no es eficaz debido a su pequeño diámetro causado por el desgaste se procede a su renovación. Se utilizan trajes adecuados para evitar accidentes, pero también existen equipos automatizados para el manejo de este abrasivo donde el operador no tiene que exponerse al chorro de este abrasivo, sino más bien solo apretar unos botones (Díaz Martínez, 2016). El polvo producido en la operación es solo básicamente el resultado de los materiales removidos sobre la superficie a tratar. Debido a que no absorbe humedad, la granalla de acero no requiere de un secado previo y al ser todas las partículas de similar granulometría, producen un trabajo totalmente uniforme (Forn, 2018).

1.3.3 Obtención

Las granallas se obtienen por atomización del acero líquido, seguido de una serie de tratamientos térmicos y mecánicos que le confieren características técnicas que se adaptan a las necesidades de los usuarios; generalmente los perdigones se tratan térmicamente mediante un proceso de revenido y templado para quitar la basta estructura martensítica obtenida de la atomización sobre agua. La granalla se fabrica mediante la fusión de chatarra, cuidadosamente seleccionada en su calidad y sometida a un control de detección de radioactividad (Forn, 2018).

La fusión se realiza en hornos eléctricos. Durante la atomización, el caldo metálico se transforma en las partículas de granalla. El tamaño de las partículas de granalla y su forma física son exhaustivamente controlados. En procesos continuos, y en instalaciones totalmente automatizadas, la granalla es sometida a tratamientos térmicos que permiten conseguir las características mecánicas especificadas para cada aplicación. La granalla angular se obtiene por molienda de granalla redonda. Después de la clasificación final en los diversos tipos granulométricos, se procede al envasado (Forn, 2018).

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este apartado se expondrán los datos mínimos necesarios para la fabricación del equipo revoledor para realizar la granulación de un material vertido en agua obtenido de trabajos anteriores, se tendrá en cuenta los cálculos a realizar, así como el reservorio el cual será utilizado para el vertido del material.

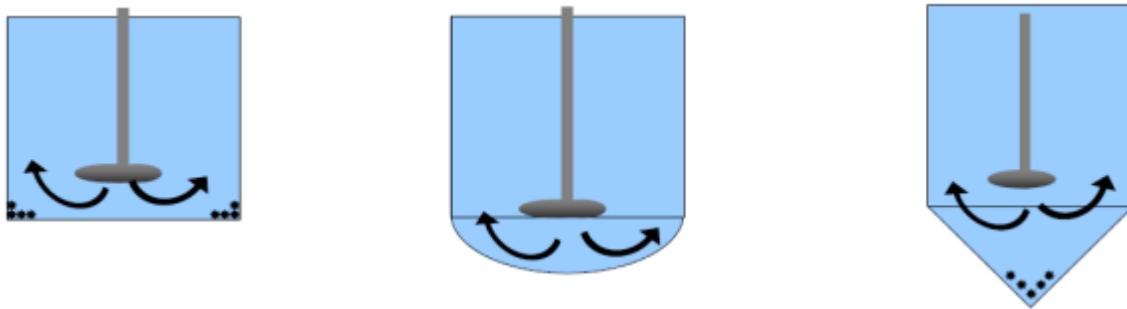
2.1 Diseño y fabricación de un agitador mecánico para la granulación y obtención de las granallas de acero

Se ha decidido fabricar un dispositivo que permita granular las aleaciones de hierro obtenidas mediante el procesamiento aluminotérmico en el Centro de Investigaciones de Soldadura (CIS). Con el dispositivo se posibilita el estudio de la granulación en condiciones húmedas, realizando adecuaciones en función de lograr mayor simplificación y menor costo. En tal caso, la idea se sintetiza en fabricar un dispositivo mecánico que se acople al recipiente donde se alojará el agua para verter el metal fundido, al girar las hélices del agitador, agita el agua y crea una turbulencia la cual permite granular el metal que va cayendo al recipiente durante la operación de vertido directamente desde el crisol donde se realizó el procesamiento (Rodríguez, 2015-2016).

En el diseño de sistemas de tanques agitadores se utilizan los siguientes parámetros para crear relaciones adimensionales para el escalamiento y el dimensionamiento: el diámetro interno del tanque, D , y la altura, H_i ; el diámetro, D , y el espesor, t_p , del propulsor; la altura del propulsor por encima del fondo del tanque, H_P ; y el ancho de pantalla, B_w . Se supone que existen cuatro pantallas por tanque. La figura 2.1 resume las relaciones de diseño para dimensionamiento de un tanque simple.

$0.2 < D_p/D_i < 0.5$	(flujo turbulento)
$0.7 < D_p/D_i < 1.0$	(flujo laminar)
$B_p/D_i = \frac{1}{12}$	
$H_p/D_i = \frac{1}{3}$	
$H_i/D_i = 1$	
$t_p/D_p = \frac{1}{5}$	

Figura 2.1 Relaciones de diseño para el dimensionamiento de un tanque simple. (Streeter et al., 1998)



a) Reservorio fondo plano

b) Reservorio fondo cóncavo

c) Reservorio fondo triangular

Figura 2.2 Influencia de la geometría del depósito en la agitación.

Es importante aclarar que en la realización de este proyecto no se utilizarán pantallas. Sin pantallas se puede obtener una mezcla completa localizando el agitador-mezclador por fuera del centro del tanque si este es circular, o utilizando un tanque de geometría rectangular. En la realización de este proyecto, se utilizará un tanque rectangular que existe en CIS para la granulación de aleaciones fundidas, sin utilizar sistemas de agitación. Este sistema responde a los requerimientos de la figura 2.2 b.

2.2 Impulsores o agitadores

Como se puede ver en la figura 2.3 los impulsores pueden tener un flujo axial o radial. Los de flujo axial poseen un ángulo menor a 90° en sus aspas con respecto al plano de rotación, comúnmente son colocados este tipo de impulsores en la parte lateral del tanque centrados o excéntricos y sujetos con una brida o también se pueden colocar en el fondo del tanque. Los de flujo radial poseen las aspas colocadas de forma paralela al eje

de la flecha, para tanques pequeños es común que se diseñen con múltiples aspas mientras que los tanques de mayor volumen poseen menor cantidad de aspas (Streeter, 1999).

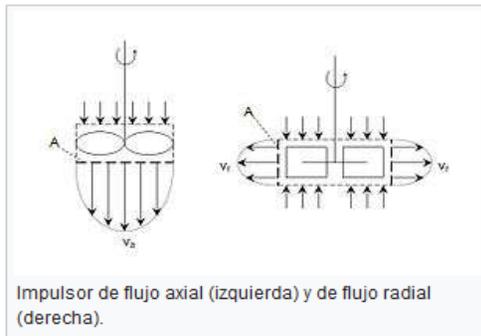


Figura 2.3 Tipos de impulsores según su flujo.

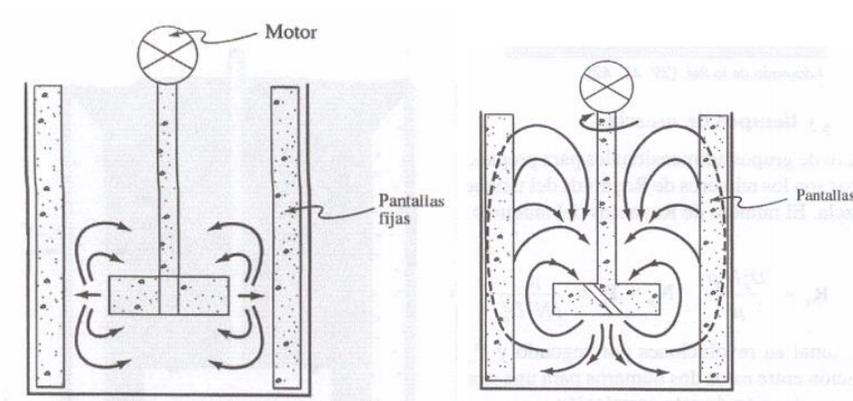


Figura 2.4 Campos de circulación para diferentes agitadores, radial y axial (Streeter, 1999).

El prototipo a utilizar debe tener características semejantes al esquema mostrado en la figura 2.5.



Figura 2.5 Prototipo a seguir para el diseño del agitador.

2.3 Diseño del dispositivo agitador para la granulación de las aleaciones

El agitador va a contener una hélice o impulsor en el extremo o a lo largo de una flecha que se ubica en el centro del tanque, transversalmente o de forma excéntrica. Un agitador puede contener una, dos o más flechas con una, dos o más hélices en cada flecha. En el diseño de este dispositivo solo se empleará una flecha con tres álabes.

La velocidad que alcanzan estos equipos depende de lo que se desea mezclar, para mezclar dos líquidos miscibles de baja viscosidad es necesario un esfuerzo cortante mucho menor que el que se necesita para dispersar un líquido de alta viscosidad en otro de media viscosidad. Algunos agitadores funcionan desde 100 RPM hasta varios miles de RPM. La velocidad óptima para la mejor granulación deseada viene dada por las RPM del motor a utilizar y la relación de transmisión que se emplee en la fabricación del dispositivo. En el diseño se utilizó una transmisión por correas, donde la velocidad de rotación óptima, no se conoce; es un parámetro a investigar.

Un estado de turbulencia es el resultado de una falla en un flujo previamente uniforme, en cuyo caso se forman remolinos, los cuales se propagan hasta «contaminar» una región del flujo, produciendo movimientos irregulares. Si las condiciones son propicias, la turbulencia persiste como un estado de movimiento casi permanente. Una fuente de turbulencia generadora de remolinos, se presenta en la superficie cuando hay discontinuidad de flujo, lo cual ocurre siempre que dos corrientes de fluido corren juntas de tal modo que exista una marcada diferencia de velocidades entre sus capas

adyacentes. Ejemplos de esto son las turbulencias que se producen en la vecindad de las aristas o bordes angulosos que sobresalen en cuerpos burdos, en los bordes de salida de perfiles aerodinámicos, álabes guía en turbinas y en las zonas de separación de las capas límite (Streeter, 1999). Todos estos ejemplos se ilustran en la figura 2.8

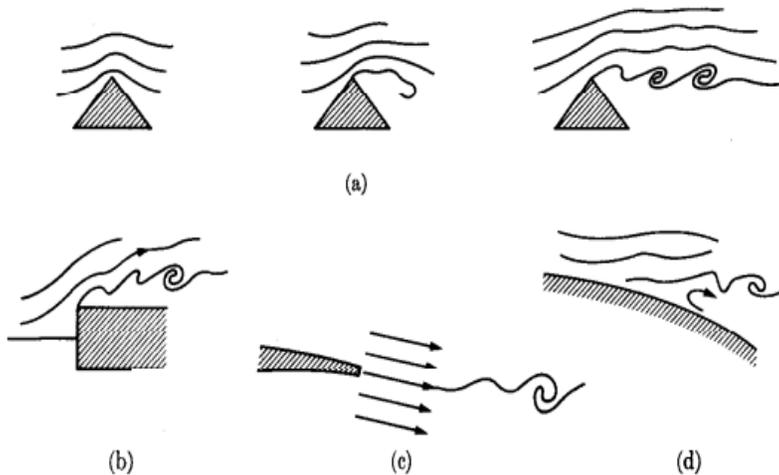


Figura 2.6 Formación de remolinos en superficies con discontinuidad en la velocidad: (a) obstáculo angular; (b) cuerpo grueso; (c) borde de rogo; (d) separación de la capa límite (Streeter, 1999).

Los regímenes laminar y turbulento son importantes y deben tomarse en cuenta para el diseño del agitador mecánico, un número utilizado por los ingenieros químicos es el número de Reynolds. El número de Reynolds N_{Re} según (Streeter, 1999) para tanques agitados viene dado por: $N_{Re} = D^2_a * N * \rho / \mu$ donde:

D = diámetro del impulsor, m

ρ = densidad del fluido, Kg/m³

μ = Viscosidad absoluta o dinámica, Pa*s

N = velocidad del agitador, rev/s

La turbulencia puede ser medida o estimada aparte del número de Reynolds por medio de parámetros como el movimiento masivo o difusión de Taylor, la intensidad y la escala de turbulencia. En problemas donde el fluido considerado es el agua, se ha demostrado mediante experimentación en laboratorios que entre un número de Reynolds de 2.000 a

3.000 se encuentra la etapa de transición laminar-turbulento en el flujo de la capa límite. Sin embargo, para efectos prácticos se considera: $Re \leq 2000$ el flujo será laminar. Un flujo se considera turbulento, si el número de Reynolds es mayor de 10 000 (adimensional). Las contracorrientes influyen también en el desarrollo de flujos que ayudan al mezclado eficiente de los materiales. La velocidad del agitador y las características del impulsor son básicas para su buen funcionamiento.

2.3.1 Cálculo del número de Reynolds para el agitador mecánico

$$N_{Re} = D_a^2 * N * \rho / \mu \quad (2)$$

El diámetro del impulsor con exponente 2 es: $D_a^2 = (330 \text{ mm})^2 = (0,33 \text{ m})^2 = 0,1089 \text{ m}^2$,

La densidad del fluido se tomará, como la densidad del agua a 35 °C es $\rho_{agua\ 35} = 994,08 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ y su viscosidad: $\mu_{agua\ 35} = 0,723 * 10^{-3} \text{ Pa} * \text{s}$ despejando,

$$N_{Re} = D_a * N * \rho / \mu$$

Como no se conocen las RPS del agitador y es lo que se quiere determinar, se establece el valor de N_{Re} . Cuando $N_{Re} > 10000$ se conoce que el régimen es turbulento; debiéndose cumplir esta condición para lograr la granulación.

Por tanto inicialmente se asume que $N_{Re}=10000$

Por tanto, como lo que se quiere determinar, son las RPS del agitador, se despeja N de la ecuación anteriormente planteada.

$$N > \frac{R_t * \mu}{D_a^2 * \rho} \quad N > \frac{10^4 * 0,723 * 10^{-3}}{0,1089 * 994,08} \quad N > \frac{7,23}{108,2553} \text{ RPS}; \text{ luego } N > 0,066786561 \text{ RPS}$$

Al analizar el resultado obtenido se puede observar que prácticamente el agitador no gira, por lo que se necesita incrementar el número de Reynolds. Para facilitar los cálculos se recurrió a la ayuda del software Excel para tabular los resultados obtenidos mediante las variaciones de las revoluciones del agitador (ver anexo 1).

Con la información de la tabla del anexo 1, se obtiene que para $N_{Re}=759375$ el agitador rota a 5,072 RPS; por lo que se asume inicialmente que el agitador rota a 6 RPS (360 rpm), valor que se tomará como referencia para realizar el resto de los cálculos y los

ensayos iniciales. A partir de los resultados que se obtengan podrán realizar adecuaciones en este sentido.

2.3.2 Cálculo de las fuerzas a las que está sometido el agitador mecánico

Las fuerzas distribuidas, producidas por la acción de un fluido sobre un área finita, pueden reemplazarse convenientemente por fuerzas resultantes, en lo que respecta a las reacciones externas al sistema de fuerzas

Para el dispositivo diseñado se desprecian las fuerzas proporcionadas por la flecha debido a su forma cilíndrica, y sólo se calcularán las resistencias ocasionada por el área del impulsor (álabe), siendo esta la de mayor tamaño, originando resistencias apreciables al movimiento ante el fluido. Para realizar este cálculo fueron empleadas las fórmula de resistencia para áreas planas con inclinación (Streeter, 1999).

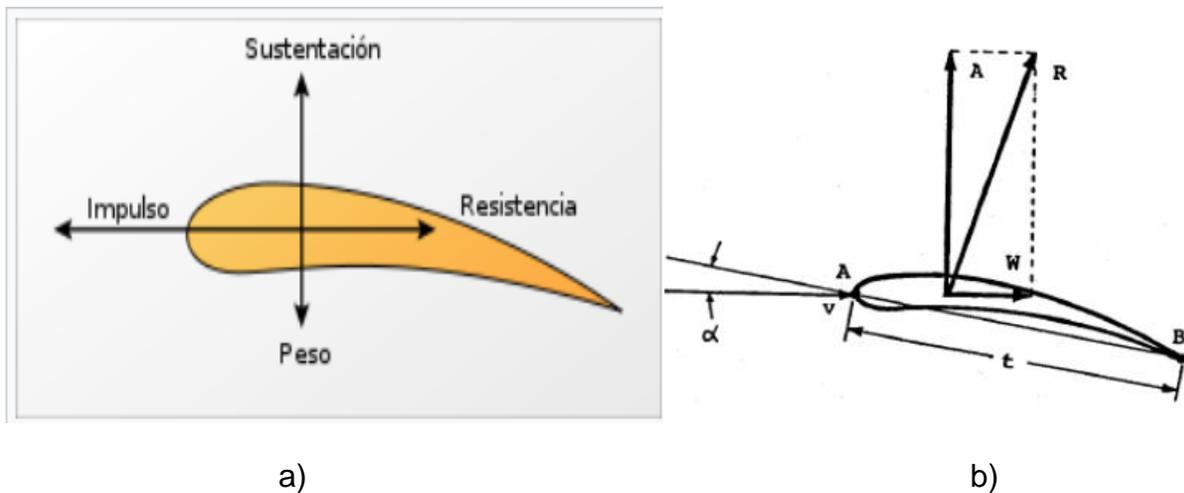


Figura 2.7 Fuerzas que actúan sobre un perfil aerodinámico, a) muestra la Sustentación oponiéndose al peso, y el impulso o tracción oponiéndose a la resistencia aerodinámica o fuerza de arrastre.

Definiciones (Fig. 2.7-b):

\overline{AB} : *cuerda del perfil* (anchura del ala): línea imaginaria que une entre sí los puntos del perfil más alejados

α : *ángulo de ataque*: ángulo que forma la cuerda del perfil con la dirección (horizontal) del aire

t : longitud (cuerda) del perfil = anchura del ala

El canto anterior del perfil se llama *borde de ataque*, el canto posterior, *borde de fuga*. La parte inferior del perfil se llama *intradós* y la parte superior *extradós*. En un punto del perfil llamado *centro dinámico* de momento no definido se crea una fuerza R, que se puede descomponer en una componente vertical A (*sustentación*) y en una componente horizontal W (*resistencia*) (Fig. 2.9-b).(Franquesa i Voneschen, 2009)

-Cálculo de la fuerza de arrastre en los álabes del agitador

Como se estableció anteriormente el agitador debe girar a 360 rpm, los cálculos se realizan sobre este criterio.

$$Fuerza_{arrastre} = C_d * A * \rho * \frac{V^2}{2} \quad (2.1)$$

Donde:

C_d : es el coeficiente de arrastre; $C_d = 0,12$ tratándose el álabe como una placa plana con un ángulo de ataque de 10° (Schames, 1995); A : es el área de la proyección del cuerpo en un plano perpendicular al flujo (igual a $3,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$); ρ : es la densidad del fluido (la densidad del agua es de $994,08 \text{ Kg/m}^3$ a $35 \text{ }^\circ\text{C}$) y V : es la velocidad a la que se desplaza la hélice del agitador en m/s. Se necesita que la velocidad esté en m/s, luego hay que calcularla; los cálculos se realizarán para 360 rpm, pero es importante aclarar que la velocidad es proporcional a la fuerza de arrastre. **1rpm= 0,10472rad/s** puesto que hay que convertir las rpm a velocidad angular (w).

$$w = rpm * 0,10472 \quad (2.2)$$

$w = 360 * 0,10472$ $w = 37,7 \text{ rad/s}$; luego

$$v = w * r \quad (2.3)$$

donde r es la longitud del álabe.

$v = 37,7 * 0,165$ $v = 6,2205 \text{ m/s}$, entonces

$$F_{arrastre} = C_d * A * \rho * \frac{V^2}{2} \quad (2.4)$$

$$F_{arrastrre} = 0,12 * 0,00033 * 994,08 * \frac{6,2205^2}{2} = 0,762 \text{ N}$$

-Cálculo de la fuerza de sustentación en los álabes del agitador

$$F_{sustentación} = C_l * A * \rho * \frac{V^2}{2} \quad (2.5)$$

donde $C_l = 0,6$ (Schames, 1995) es el coeficiente de sustentación del álabe y $A = 9,9 * 10^{-4} \text{ m}^2$ se define como la longitud de la cuerda multiplicada por la longitud del ala (área proyectada máxima del ala). Se ha adoptado esta convección debido a que la sección transversal del ala cambia con el ángulo de ataque, tanto en la dirección del flujo como en ángulos normales a ésta. El ángulo de ataque α es el ángulo entre la cuerda de la sección de superficie y el vector velocidad de la corriente libre (Streeter, 1999).

$$F_{sustentación} = 0,6 * 9,9 * 10^{-4} * 994,08 * \frac{6,2205^2}{2} = 14,734 \text{ N}$$

De acuerdo a la bibliografía la mayor velocidad tangencial se obtienen en la parte exterior del alabe, tal como muestra la figura 2.9, con la coloración rojiza (Huerto Bujaico, 2013).

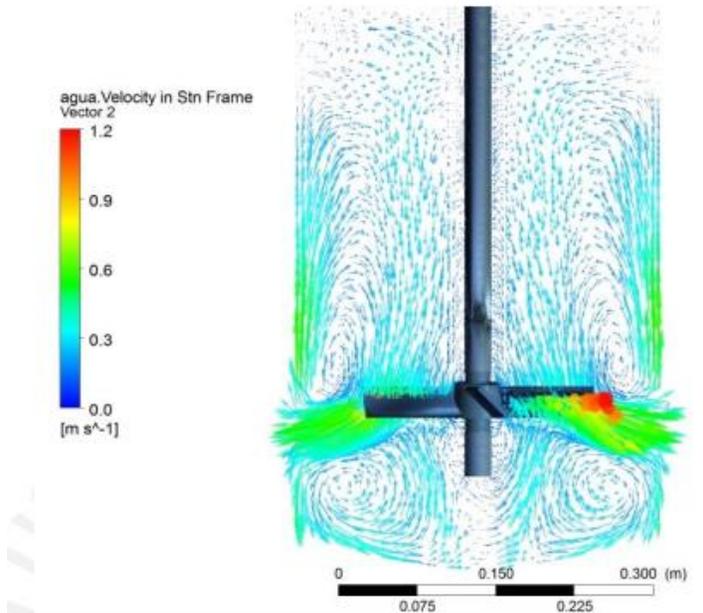


Figura 2.8 Ejemplo de un gráfico de vectores de velocidad en un tanque agitador (Huerto Bujaico, 2013).

2.3.3 Cálculo de la potencia consumida por el agitador

La potencia que se necesita para que funcione el agitador viene implícita en

$$N_p = \frac{P}{N^3 * d^5 * \rho} \quad (2.6)$$

donde P es la potencia consumida en W, N son las RPS a que gira el agitador, d el diámetro del agitador, ρ es la densidad y N_p el número de potencia, el cual es adimensional y se halla mediante tablas.

Según (Uribe, 2013) para una hélice de tres álabes, y un $Re=10^6$, $N_p=0,32$; los demás datos ya se tienen calculados, luego se despeja P de la fórmula anterior:

$$P = N_p * N^3 * d^5 * \rho = 0,32 * 6^3 * 0,33^5 * 994,08 = \mathbf{268,9 W}$$

Para la selección del motor, se tomó en consideración el cumplimiento de la potencia y velocidad requerida para la agitación (360 rpm y $P \geq 268,9 W$), por lo que se selecciona un motor de 0,382 kW, donde el eje del motor queda en posición vertical.

2.3.4 Diseño de la transmisión flexible para el movimiento del agitador

Se conoce como correa de transmisión a un tipo de transmisión mecánica basado en la unión de dos o más ruedas, sujetas a un movimiento de rotación, por medio de una cinta o correa continua, la cual abraza a las ruedas ejerciendo fuerza de fricción suministrándoles energía desde la rueda motriz (Robert L.Mott, 2006).

En las transmisiones por correa se calculan parámetros tales como: velocidad de las poleas, diámetro de paso de las mismas, longitud de paso, distancia entre centros, etc., hasta llegar al número de correas que se van a emplear, útiles para el diseño y el dimensionamiento.

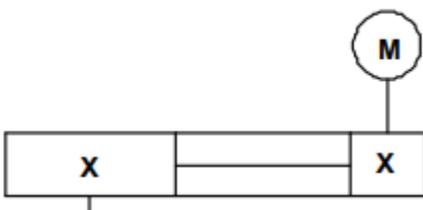


Figura 2.9 Esquema cinemático de la transmisión a emplear en el agitador.

- Selección de la correa:

$$T_1 = 9550 * \frac{P_1}{n_1} \quad (2.7)$$

$$T_1 = 9550 * \frac{0,75}{1720} = 4,164 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Con este valor de torque, se selecciona en la **tabla 22**, de (Ortega, 2015) la **correa tipo Z**,

- Diámetro de paso de las poleas (diámetro primitivo)

Se debe cumplir la condición $D_{1\min} \leq D_1 \leq D_{1\max}$

En la tabla 22, para la correa tipo Z, se seleccionan los valores necesarios, tales como $D_{1\min}=63 \text{ mm}$ y $V_{\max}=25 \text{ m/s}$; para el chequeo de la condición antes planteada:

$$D_{1\max} = \frac{6 * 10^4 * V_{\max}}{\pi * n_1} \quad (2.8)$$

$$D_{1\max} = \frac{6 * 10^4 * 25}{\pi * 1720} = 277,6 \text{ mm}$$

De esta forma, teniendo en cuenta el intervalo: $63 \leq D_1 \leq 277,6$ y los valores de diámetros preferidos que se recomiendan en la tabla 20 de (Ortega, 2015) se selecciona **$D_1= 63 \text{ mm}$** para optimizar materiales. Entonces se calcula D_2 por la relación de transmisión:

$$D_2 = \frac{n_1}{n_{II}} * D_1; \quad (2.9)$$

$$D_2 = \frac{1720}{360} * 63 = 300 \text{ mm}$$

- Velocidad de la correa

Condición: $V_{\min} < V < V_{\max}$

Se considera la velocidad mínima de la correa: $V_{\min} \approx 5 \text{ m/s}$ la velocidad de la correa se calcula de la siguiente forma:

$$V = \frac{\pi * D_1 * n_1}{60000} \quad (2.10)$$

$V = \frac{\pi \cdot 63 \cdot 1720}{60000} = 5,67 \text{ m/s}$ El valor obtenido se encuentra en el rango de la condición planteada.

- Distancia entre centros de referencia

$$A_{\text{mín}} \leq A_r \leq A_{\text{máx}}$$

$$A_r = \frac{1,5 \cdot D_2}{\sqrt[3]{u}} = \quad (2.11)$$

$$\frac{1,5 \cdot 300}{\sqrt[3]{1720/360}} = 267,18 \text{ mm} \approx A = 270 \text{ mm (no hay restricciones)}$$

Se halla la distancia entre centros mínima:

$$A_{\text{mín}} = 0,55(D_1 + D_2) + h \quad (2.12)$$

$$A_{\text{mín}} = 0,55(63 + 300) + 6; A_{\text{mín}} = 205,65 \text{ mm}$$

La altura de la correa se toma de la tabla 22 de (Ortega, 2015): $h = 6 \text{ mm}$

Se calcula la distancia entre centros máxima:

$$A_{\text{máx}} = 3(D_1 + D_2) \quad (2.13)$$

$$A_{\text{máx}} = 3(63 + 300); A_{\text{máx}} = 1089 \text{ mm}$$

- Longitud del paso de la correa:

$$L = 2 \cdot A_r + 1,57 \cdot (D_1 + D_2) + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4A} \quad (2.14)$$

$$L = 2 \cdot 270 + 1,57 \cdot (63 + 300) + \frac{(300 - 63)^2}{4 \cdot 270}; L = 1161,92 \text{ mm}$$

Este valor de longitud se debe normalizar y para esto se recurre a la tabla 19 de (Ortega, 2015), en la cual se tiene que la longitud más cercana es de $L = 1120 \text{ mm}$.

Una vez normalizado el valor de la longitud entonces se comprueba la condición $L_{\text{mín}} < L < L_{\text{máx}}$. Los valores de $L_{\text{mín}} = 400 \text{ mm}$ y $L_{\text{máx}} = 2500 \text{ mm}$ se toman de la tabla 22 de (Ortega, 2015).

El resultado está dentro del rango por lo que se puede decir que es satisfactorio.

-Distancia entre centros definitiva

$$A = \frac{l + \sqrt{l^2 - 32 * (D_2 - D_1)^2}}{16} \quad (2.15)$$

$$l = 4L - 6,28 * (D_2 + D_1) \quad (2.16)$$

$$l = 4 \cdot 1120 - 6,28 * (300 + 63) = 2200,36 \text{ mm}$$

$$A = \frac{2200,36 + \sqrt{2200,36^2 - 32 * (300 - 63)^2}}{16} = 246,57 \text{ mm}$$

- Ángulo de abrazado en la polea menor

$$\theta = 180 - \frac{57,3 * (D_2 - D_1)}{A} \geq \theta_{\text{mín.}} \quad (2.17)$$
$$= 90^\circ \dots 120^\circ$$

$$\theta = 180 - \frac{57,3 * (237)}{661} = 159,46^\circ > 120^\circ$$

- Cálculo de resistencia de las correas

Se calcula el número de correas necesarias:

$$N_n = \frac{P_1}{[P]} \quad (2.18)$$

Donde [P] es la potencia que puede transmitir una correa durante un tiempo prolongado y se calcula por la ecuación:

$$[P] = \frac{P_0 * C_\theta * C_l + \Delta P_u}{K_s} \quad (2.19)$$

La potencia básica P_0 se obtiene de la tabla 20 de (Ortega, 2015). En este caso se tiene que interpolar para determinar su valor.

$$\frac{10 - 5}{0,82 - 0,49} = \frac{10 - 5,67}{0,82 - P_0} \rightarrow P_0 = 0,534 \text{ kW}$$

El coeficiente que tiene en cuenta la influencia del ángulo de abrazado en la rueda conductora:

$$C_{\theta} = 1,24 * \left(1 - e^{-\frac{\theta}{110}}\right) \quad (2.20)$$

$$C_{\theta} = 1,24 * \left(1 - e^{-\frac{159,46^{\circ}}{110}}\right) = 0,9486$$

El coeficiente que tiene en cuenta la influencia de la longitud de la correa (C_L) se obtiene de la tabla 4 de (Ortega, 2015) a partir de la relación:

L_0 se obtiene de la tabla 1: $L_0=1320$ mm

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1120}{1320} = 0,85$$

Interpolando se tiene: $\frac{1-0,8}{1-0,95} = \frac{1-0,85}{1-C_L} \rightarrow C_L = \mathbf{0.9625}$

El coeficiente que tiene en cuenta el régimen de trabajo K_s se toma de la tabla 25 de (Ortega, 2015) teniendo en cuenta el tipo de máquina: $K_s = \mathbf{1,1}$

La variación de la potencia útil se calcula según la expresión:

$$\Delta P_u = \frac{\Delta T_u * n_1}{9550} \quad (2.21)$$

La variación del torque útil ΔT_u se obtiene de la tabla 5 de (Ortega, 2015) a partir de la relación de transmisión:

$$u = \frac{D_2}{D_1} = \frac{300}{63} = 4,762 \rightarrow \Delta T_u = 0,5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

De esta forma:

$$\Delta P_u = \frac{0,5 * 1720}{9550} = 0,09 \text{ kW}$$

Sustituyendo todos los datos, se puede ya calcular la potencia.

$$[P] = \frac{0,534 * 0,9486 * 0,9625 + 0,09}{1,1} = 0,525 \text{ kW}$$

El número de correas necesarias:

$$N_n = \frac{P_1}{[P]} \quad (2.22)$$

$$N_n = \frac{0,75}{0,525} = 1,43 \text{ Correas}$$

Cálculo del número de correas, teniendo en cuenta la distribución irregular de la carga entre estas:

$$N = \frac{N_n}{C_n} \leq N_{m\acute{a}x} = 12 \quad (2.23)$$

El coeficiente que tiene en cuenta la distribución irregular de la carga entre las correas C_n se obtiene de la tabla 24 de (Ortega, 2015): $C_n=0,95$

$N = \frac{1,43}{0,95} = 1,51 \rightarrow N = 2 \text{ Correas} < 12$ Es importante señalar que, para el diseño del agitador, solo se empleará una correa.

-Pretensión de la correa

Se calcula la tensión en cada correa debido a la fuerza de pretensión:

$$\sigma_0 = \frac{F_0}{A_c} \geq \sigma_{olim}(2 - estrechas) \quad (2.24)$$

Donde:

A_c es el área de la sección transversal de la correa seleccionada, que se toma de la tabla 22 de (Ortega, 2015): $A_c=47 \text{ mm}^2$

La fuerza de pretensión, en una correa, necesaria para transmitir la potencia requerida por el agitador, se calcula por la siguiente expresión:

$$F_i = \frac{780 * P_1 * K_s}{N * V * C_\theta} + q_m * V^2 \quad (2.25)$$

Donde q_m es la masa de un metro de correa que se encuentra en la tabla 22 de (Ortega, 2015):

$$q_m = 0.06 \text{ Kg/m}$$

$$F_i = \frac{780 * 0,75 * 1,1}{1 * 7,205 * 0,9486} + 0,06 * 7,205^2 = 97,263 \text{ N}$$

Se obtiene entonces que: $\sigma_0 = \frac{F_i}{A_c} = \frac{97,263}{47} = 2,07 \text{ MPa}$

$$\sigma_0 = 2,07 > 1.6 = \sigma_{0 \text{ min}}$$

Se cumple con la condición exigida para las correas estrechas.

Fuerza sobre los árboles.

$$R_1 = R_2 = 2 * F_i * N * \text{Sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (2.26)$$

$$R_1 = R_2 = 2 * 97,263 * 1 * \text{Sen} \left(\frac{159,46}{2} \right) = 191,41 \text{ N}$$

Principales parámetros geométricos de las poleas.

-Polea Conductora

$$D_{e1} = D_1 + 2\Delta \quad (2.27)$$

$$D_{e1} = 63 + 2 * 2,5 = 68 \text{ mm}$$

$$D_{f1} = D_{e1} - 2H \quad (2.28)$$

$$D_{f1} = 68 - 2 * 9,5 = 49 \text{ mm}$$

$$B = (N - 1)t + 2 * S \quad (2.29)$$

$$B = (1 - 1)25.5 + 2 * 17 = 34 \text{ mm}$$

-Polea Conducida

$$D_{e2} = D_2 + 2\Delta \quad (2.30)$$

$$D_{e2} = 300 + 2 * 2,5 = 305 \text{ mm}$$

$$D_{f2} = D_{e2} - 2H \quad (2.31)$$

$$D_{f2} = 305 - 2 * 9,5 = 286 \text{ mm}$$

2.3.5 Diseño de la flecha y demás componentes del agitador mecánico

Como se había planteado anteriormente el dispositivo va a contener una sola flecha, encargada de transmitir el torque necesario para mover los álabes del agitador. Se pretende construir el árbol o flecha para lo cual se utiliza el Software Inventor 2016.

La flecha va estar formada por un árbol de 643 mm de largo y 20 mm de diámetro en la mayor sección; tendrá 5 escalones que donde en la figura 2.10 de izquierda a derecha van a estar situados el porta hélices, las dos chumaceras y la polea conducida.



Figura 2.10. Árbol a construir para el agitador (diseño propio).

Seguidamente se diseña la base de los pedestales, la que se realizará de una lámina de acero 1010 de 5 mm de espesor. Es una pieza rectangular de 56 cm de largo y 23 cm de ancho, la que se le efectuarán dos dobleces y 6 agujeros de diámetro 10 mm como muestra la figura 2.11.

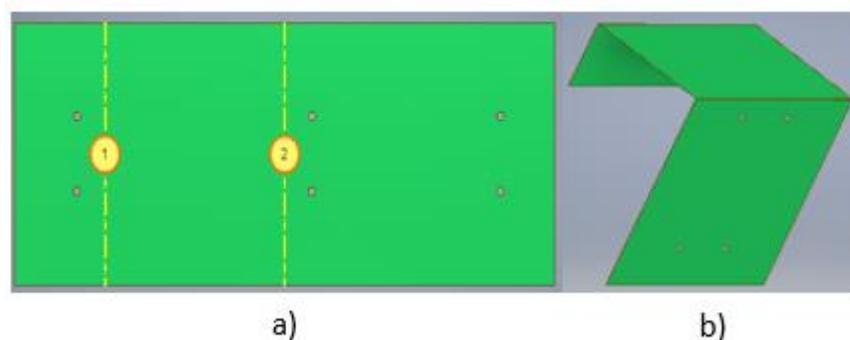


Figura 2.11 Orden de pliegue (a) y pieza plegada (b) de la base que sujetará los pedestales mediante uniones roscadas (diseño propio).

Las chumaceras se diseñaron mediante una unión soldada que une la pieza que contiene al cojinete y la base de dicha chumacera que se sujetan a la pieza base, se utilizaron rodamientos 6203 Z. En la figura 2.12 se muestra el diseño de la chumacera y del porta hélices.

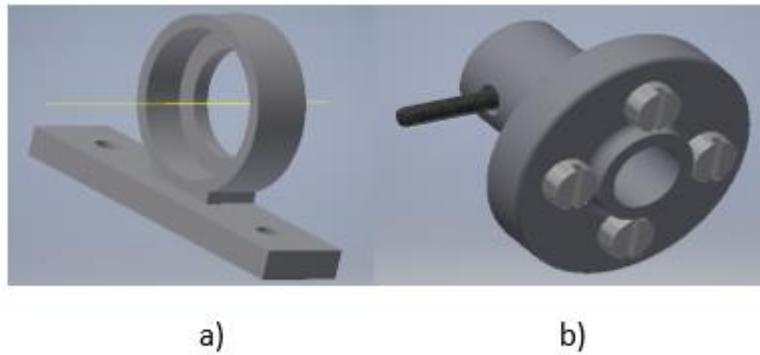


Figura 2.12 Chumacera y porta hélices del agitador (diseño propio).

2.4 Evaluación del sistema de granulación

2.4.1 Materias Primas. Características

Como materias primas se emplearon los residuos industriales siguientes:

-Cascarilla de laminación que constituyen un desecho industrial de las plantas siderúrgicas: Antillana de Acero y ACINOX Tunas de las Tunas, utilizando cascarillas de la empresa Acinox Tunas.

-Virutas de aluminio procedentes de la Empresa Antenas de Santa Clara. Estas virutas constituyen un subproducto del proceso de corte y maquinado, las que se reciclan a través de la empresa recuperadora de materias de Cuba.

-Grafito, obtenido de la trituración de los trozos de torchos partidos en la fundición de Planta Mecánica.

La composición química de estos componentes se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Composición química de las diferentes materias primas utilizadas (%)

Cascarilla		Virutas de aluminio	
Comp.	Contenido	Comp.	Contenido
Fe₂O₃	20-30	Si	0,3-0,6
Fe₃O₄	40-60	Fe	0,1-0,3
FeO	15-20	Mn	0,1
Fe	2-5	Cu	0,1
Fe prom	68,83	Mg	0,35-0,6
O₂ prom	24,18	Zn	0,15
Impurezas	5,00	Cr	0,05
		Ti	0,1
		Al	balance

2.4.2 Preparación de las materias primas

Los equipos e instrumentos utilizados en la preparación de las materias primas fueron los siguientes.

- Balanza técnica.
- Estufa eléctrica (temperatura hasta 400 °C).
- Mezcladora de polvos.
- Tamizadora, con diferentes tamices.
- Reactor de grafito de 2,2 L de capacidad.
- Agitador mecánico.
- Recipiente con agua.

Las cascarillas son productos de relativa alta pureza, ya que están formadas, en su inmensa mayoría, por los diferentes óxidos de hierro y el hierro metálico por lo que para la realización de los cálculos de carga se asumió que todo el hierro presente se encontraba en forma de óxido de hierro (III).

Las virutas de aluminio utilizadas como reductor proceden de las operaciones de maquinado en la Fábrica de Antenas de Santa Clara, por lo que primeramente fueron lavadas y secadas al sol y finalmente se tamizaron con un tamiz de 2,00 mm. El Grafito, proveniente de los electrodos partidos del horno eléctrico de arco de la Empresa "Fabric

Aguiar Noriega” (Planta Mecánica) es triturado hasta lograr una granulometría por debajo de 0,2 mm, con lo cual se logra aumentar la reactividad del mismo.

2.4.3 Mezclas a ensayar

Para realizar los ensayos se utilizaron formulaciones evaluadas en trabajos anteriores (González, 2016). La cantidad y composición de las mezclas a ensayar se puede observar en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Mezcla a reproducir para el conformado de las cargas

Componentes	Carga patrón con carbón (I)	Carga patrón con carbón y escoria (II)
Cascarilla	100	100
Aluminio	34	38
Grafito	3	3
Escoria	-	20
Total	137	161

2.4.4 Obtención de las aleaciones

Para la obtención de las aleaciones, se colocó cada mezcla caliente en un reactor de grafito de 2,2 L de capacidad, de fondo cónico, con un orificio en el fondo para facilitar la extracción de los productos. La reacción se inició, mediante un chispazo con arco eléctrico. La alimentación al horno, con la mezcla metalúrgica, se efectúa de forma continua, en la medida en que transcurre la reacción química, donde una vez procesada toda la carga se vierte el fundido en un recipiente con agua donde es granulada por el agitador; para luego extraer y separar la escoria y el metal, del recipiente con agua. Los productos que quedan en el interior del crisol son separados una vez que el mismo se enfría. En la figura 2.13 se muestra una foto del equipamiento utilizado para el procesamiento.

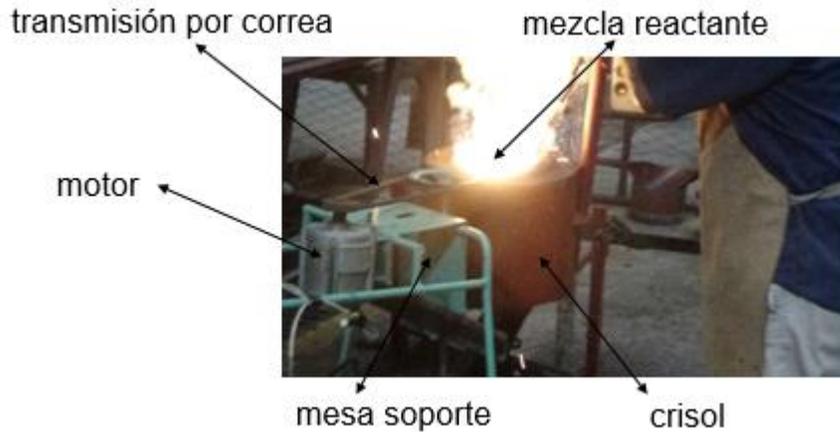


Figura 2.13 Reactor de grafito durante el procesamiento aluminotérmico.

Al finalizar el proceso se extraen los productos y se evalúan los resultados.

2.6 Estudio de granulación

Para la evaluación se utilizaron las dos formulaciones señaladas en la tabla bbbb, aunque la mayor parte de las pruebas se realizaron con la carga **Patrón + carbono**. Para el estudio, las mezclas se conformaron pesando 5 veces cada compuesto; excepto la primera realizada que se hizo pesando 10 veces sus componentes, lo cual permite aumentar el tamaño de la muestra a evaluar.

Para el primer vertido se utilizó una canal que permitía llevar el fundido desde el crisol hasta la cubeta.

La aleación recogida en el agua, fue separada y secada. Posteriormente estos productos fueron pesados. Para el estudio de granulometría primeramente se trituró y tamizó, a 5 mm, el metal y la escoria que se vertió en agua. Las partículas seleccionadas para el estudio granulométrico fueron las menores que 5 mm, las que fueron tamizadas, con la ayuda de un sistema de tamices.

Capítulo III Análisis de resultados

3.1 Análisis de los resultados obtenidos en el diseño del agitador mecánico.

En este capítulo se definen los pasos seguidos en el diseño del agitador, el cual se realizó con medios existentes en el CIS y el equipamiento del taller de Mecánica de la facultad. A continuación, se exponen las diferentes partes del equipamiento del agitador propuesto.

Se fabricó una transmisión flexible de poleas y correas: Las poleas tanto conducida como conductora y el motor son las piezas partes originales que traen el diseño de fábrica las lavadoras Aurika de producción soviética, la correa según cálculo realizado en el capítulo anterior son del tipo trapezoidal Z de diámetro 450 mm.

Se fabricaron dos pedestales de forma manual en el taller de la facultad de mecánica en un torno del tipo 16K20, los rodamientos utilizados fueron de bolas, modelo 5203-z SKF, debe señalarse que el árbol no tiene movimientos axiales, por tanto, los rodamientos de bolas son adecuados.

El árbol fue fabricado en el mismo torno anteriormente señalado, se utilizó acero AISI-1020. El soporte de las paletas del agitador es del mismo material, el cual va fijado al eje mediante 2 tornillos de diámetro 8 mm.

La hélice se conformó de 3 álabes situados a 120° uno del otro para lograr la compensación del sistema y así eliminar posibles vibraciones como se puede observar en a figura a continuación:



Figura 3.1 Dispositivo porta-hélice

Para la confección de los componentes antes descritos se partió de un diseño realizado con el software Inventor 2016 de procedencia USA, siguiendo las normas cubanas de

diseño de piezas (ISPJAE, 2015). Los planos del dispositivo pueden ser observados en los anexos 4, 5, 6,7 del trabajo.

Es importante señalar que la mesa y el soporte para los pedestales no se ilustraran por separado, en el ensamble de todas las piezas se pueden detallar. En la figura 3.2a se muestra una foto del dispositivo completo ensamblado y en 3.2 b el dispositivo junto al reactor, donde se puede apreciar la turbulencia que genera durante su funcionamiento.



Figura 3.2 a) Conjunto del Agitador mecánico ensamblado y **b)** Agitador mecánico con horno de grafito y recipiente de fondo cóncavo en funcionamiento.

El grado de turbulencia que genera el dispositivo dentro de la cubeta debe ser capaz de granular las ferroaleaciones una vez realizado el vertido de las aleaciones fundidas en el agua.

3.2 Resultados del procesamiento metalúrgico y granulación

Para evaluar el equipamiento desarrollado se utilizaron formulaciones evaluadas en trabajos previos (González, 2016).

De acuerdo a las formulaciones señaladas en la Tabla 2.2 del Capítulo 2, el proceso de fusión reducción debe permitir la obtención de los productos que aparecen a continuación. La tabla 3.1 muestra las cantidades de metal que debe producir cada una de las coladas, así como la composición química de las aleaciones a obtener.

Tabla 3.1 Resultados potenciales de las cargas a procesar, para las aleaciones, en cuanto a cantidad y composición química

Elemento	Carga I		Carga II	
	Masa (g)	%-m	Masa (g)	%-m
Si	0,15	0,21	70,90	87,14
Fe	70,01	95,54	3,42	4,20
Mn	0,03	0,05	3,93	4,84
Cu	0,034	0,05	0,038	0,05
Al	0,00	0	0,00	0,00
P	0	0,00	0,01344	0,02
S	0	0,00	0,00008	1E-04
Ti	0,03	0,05	0,04	5E-06
Cr	0,02	0,02	0,019	2E-06
C	3,000	4,09	3,00	3,69
Total	73,28	100	81,36	100

Como puede observarse en la tabla 3.1 la carga I es capaz de producir teóricamente 73 g de metal y la II 81 g. En ambos casos deben obtenerse aleaciones de hierro de alto contenido de carbono, lo cual debe incrementar la dureza del metal obtenido, mejorando sus propiedades para la obtención de granallas metálicas.

Por otro lado, en la Tabla 3.2, se ofrecen las cantidades y composición química de las escorias a generar, observándose que ellas deben quedar compuestas en más del 94 % por óxido de aluminio, lo cual debe proporcionarle propiedades abrasivas y/o refractarias.

Tabla 3.2 Resultados potenciales de las cargas a procesar, para las escorias, en cuanto a cantidad y composición química

Elemento	Carga I		Carga II	
	Masa (g)	%	Masa (g)	%
SiO ₂	0,00	0	0,00	0
Fe ₂ O ₃	0,00	0	0,00	0
CaO	0,00	0,00	2,68	3,31
MgO	0,09	0,13	0,87	1,08
MnO	0,00	0	0,00	0
Al ₂ O ₃	63,77	99,87	76,38	94,58
CaF ₂	0,00	0,00	0,26	0,32
TiO ₂	0,00	0,00	0,29	0,35
Na ₂ O	0,00	0,00	0,28	0,35
S	0,00	0,00	0,004	4E-07
total	63,86	100	80,76	100,0

3.2.1 Carga Patrón + carbono (carga I). Primera colada

Esta mezcla se conformó aumentando en diez veces la cantidad de cada uno de sus componentes. El proceso de encendido y desarrollo de la reacción fue satisfactorio. Para realizar el vertido en agua se empleó una canal la que debe permitir que el metal fundido se traslade hasta el agua. En la figura 3.3 se muestra una foto del vertido.



Figura 3.3 Proceso de fundición de la carga I

En la figura 3.3 se puede observar el transcurso del vertido, donde los productos fundidos pasan desde el crisol a la canal y finalmente al agua donde el agitador provoca turbulencia dentro del recipiente lo cual debe granular los productos vertidos.

El proceso de fusión reducción de 10 cargas (carga I) de acuerdo a los resultados de la tabla 3.1, debe generar 732,8 g de aleación y 638,6 g de escoria.

Tabla 3.3 Productos obtenidos durante la colada I (en g)

Recolección	Producto	Masa	%
Vertido en agua	Magnético	342	99,4
	No magnético	2	0,6
	Total	344	100,0
Quedó en la canal	Magnético	240	96,0
	No magnético	10	4,0
	Total	250	100,0
Quedó dentro del crisol	Magnético	118	15,8
	No magnético	631	84,2
	Total	749	100

En la Tabla 3.3 se ofrecen los resultados del proceso de vertido de la carga I, donde se observa que se obtuvieron 700 g de parte fracción magnética, lo que representa el 95,5 % del potencial teórico de la carga. La fracción debe estar constituida en su gran mayoría por la aleación de hierro, aunque durante la separación pueden arrastrarse fracciones de escoria (fracción no magnética).

En el tanque se recolectaron 342 g de metal lo que representa el 48,9 % del total de metal recolectado. En la canal quedaron adheridos 240 g de fracción magnética (34 %) y 10 g de parte no magnética.

Estos productos adheridos a la canal debieron pasar al recipiente de granulación lo cual afecta la producción de granallas.

Si se suman las cantidades de metal del recipiente y la canal se obtiene que durante el vertido salieron del crisol un total de 582 g de metal, lo que representa el 83 % del metal producido y el 79 % del potencial teórico, por lo que el uso de la canal atenta contra la eficiencia del proceso en cuanto a la generación de granallas.

En el crisol quedaron 118 g de metal (16,9 % del total producido) la que de acuerdo a las características del proceso esta es la fracción metálica de mayor contaminación con escoria.

En la figura 3.4 se puede observar una foto del metal de la colada I vertido y granulado en agua, donde la mayor parte de este se extrajo del recipiente mediante un imán.



Figura 3.4 Metal vertido y granulado de la Primera colada

En la figura 3.5 se muestra una foto de los productos que quedaron en la canal y el crisol antes de la separación magnética. Como es de esperar en el caso de la escoria el metal y la escoria quedan bastante unidos, lo cual dificulta su separación.

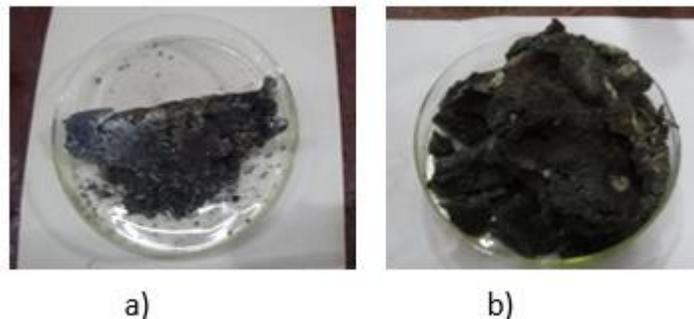


Figura 3.5 Escoria y metal obtenidos en la primera colada, a) quedó en la canal y b) quedó en el crisol

El metal recolectado en el agua fue sometido a un proceso de reducción tamaño de forma manual, donde el material obtenido fue clasificado en diferentes fracciones granulométricas. La distribución granulométrica obtenida se muestra en la tabla 3.4 y en la figura 3.6 se muestra una foto de cada una de las fracciones obtenidas.

Como puede apreciarse en la tabla 3.4, la fracción mayor está contenida entre $5 \geq x > 3$, seguida de la fracción $2 \geq x > 1$ y la $3 \geq x > 2$, donde sólo la fracción $x \leq 1$ es inferior a la que queda por encima de 5 mm. Este aspecto denota la factibilidad de realizar la molienda del metal obtenido, permitiendo obtener granallas de diferentes granulometrías.

Tabla 3.4 Distribución granulométrica del metal de carga I (primera colada) vertido en agua y triturado manualmente

Tamaño (mm)	Carga (g)	%	% acumulado
$x > 5$	34	13,6	13,6
$5 \geq x > 3$	105	42	55,6
$3 \geq x > 2$	35	14	69,6
$2 \geq x > 1$	46	18,4	88
$x \leq 1$	30	12	100
Total	252	100,00	-

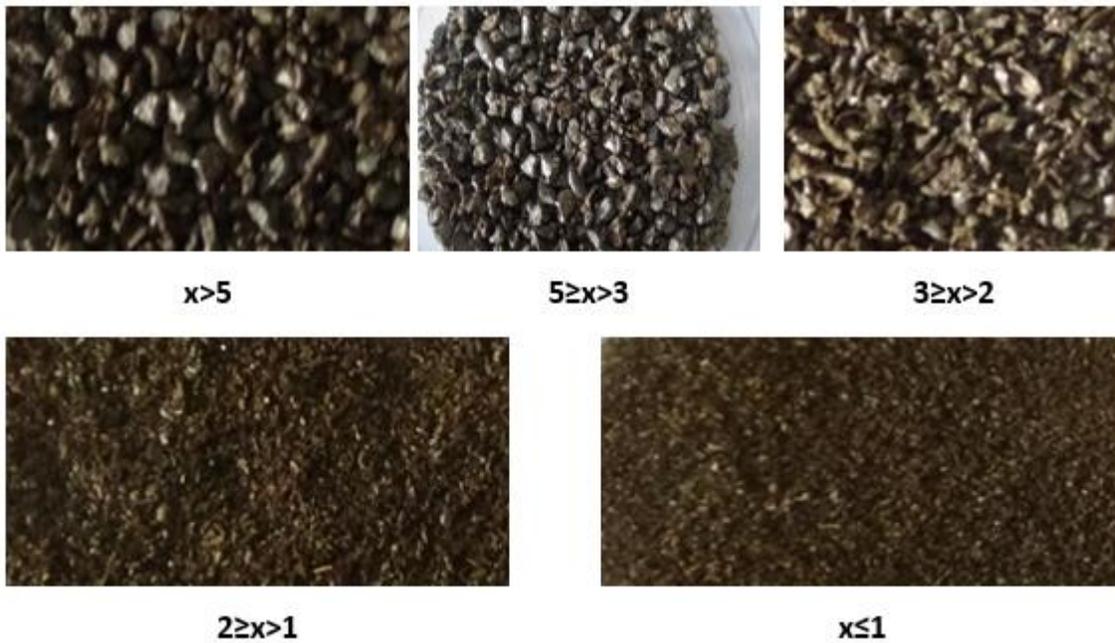


Figura 3.6 Metal vertido en agua, granulado y tamizado de la primera colada.

Las granallas obtenidas se caracterizan por tener brillo metálico y tienen una forma irregular, donde en la medida en que disminuye el tamaño de grano se van haciendo más irregulares, debido al proceso de trituración, estos aspectos pueden ser apreciados en la anterior.

Si se comparan la forma de las granallas obtenidas con productos comerciales de este tipo se puede observar que son similares, tal es el caso de la figura 1.4 del capítulo 1 y de la figura 3.7.



Figura 3.7 Granallas de acero comerciales

En cuanto a las escorias obtenidas durante el vertido en el recipiente sólo se colectaron 2 g de fracción no magnética lo que representa el 0,3 % del potencial de escoria de la carga. Esta pequeña cantidad de escoria dentro del producto granulado valida la calidad de la granalla obtenida.

En la canal quedaron 10 g de escoria (1,6 % del potencial), si se suman las cantidades de fracción no magnética del recipiente y la canal se obtiene que del crisol salió el 1,9 % de la escoria a generarse. Atendiendo a las características del proceso, la presencia de esta cantidad de escoria en las granallas no debe afectar de manera apreciable la calidad del producto obtenido como material abrasivo, sobre todo porque al entrar en contacto, las escorias, con el agua se fragilizan de manera considerable debiendo separarse durante las operaciones de reducción de tamaño.

En el crisol quedaron retenidos 611 g de escoria lo que representa el 98,8 % del total de escoria a producirse. La alta retención de las escorias durante el vertido se debe a que estos productos tienen muy alta temperatura de fusión, por lo que tienden a solidificar

rápido evitando su salida del crisol, lo cual representa una ventaja con relación al metal ya que este si es capaz de salir del crisol si el vertido se hace de manera rápida. Este método permite lograr la separación de ambos productos de manera sencilla. Por otro lado, al ocurrir el enfriamiento de las escorias dentro del crisol se garantiza que mantengan estructuras de alta dureza garantizando su empleo como material abrasivo.

El contenido de metal (parte magnética) que pueda quedar dentro de ellas puede ser eliminado después de la trituración mediante operaciones de separación magnética.

De manera general puede señalarse que el uso de la canal durante el vertido no beneficia la recuperación del metal, por lo que en el resto de las coladas no se utilizó la canal.

3.2.2 Carga con carbón y escoria (carga II). Segunda colada

Este ensayo se realizó, aumentando en 5 veces todos los componentes de la carga original (tabla 2.2, capítulo 2). Esta carga fue una de las mejores que se comportó durante el proceso de fundición, en la tabla 3.8 se dan los resultados obtenidos y en la figura 3.8 se muestra una foto de los productos obtenidos, en la que se puede apreciar la forma irregular de las granallas obtenidas antes del proceso de trituración.

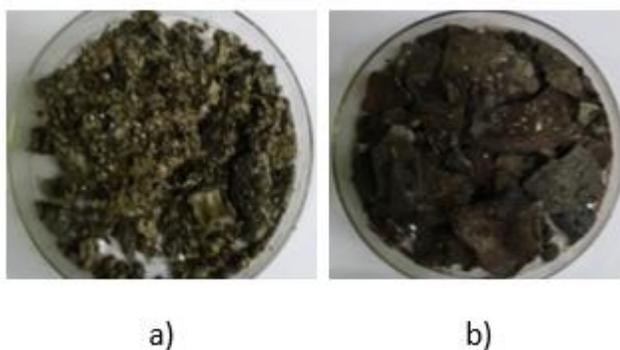


Figura 3.8 Metal vertido en agua (a) y escoria del crisol (b) de la colada 2

Como se aprecia en la tabla 3.5 del total del producto que sale del reactor el 86,3 % es producto magnético y el 13,7 es no magnético. En este caso la cantidad de escoria (producto no magnético) que sale del crisol es superior a la de la colada 1, lo cual puede deberse a que la temperatura de fusión de las escorias de la colada 1 es superior a las de la colada 2, o que a que es difícil realizar el vertido siempre en las mismas condiciones.

Tabla 3.5 Resultados de la segunda colada.

Recolección	Producto	Masa	%
Vertido en agua	Magnético	365	86,3
	No magnético	58	13,7
	Total	423	100,0
Quedó dentro del crisol	Magnético	69	19,3
	No magnético	289	80,7
	Total	358	100,0

En cuanto a la cantidad de metal que se colecta en el vertido en la tabla 3.7 se observa que se obtienen 365 g de metal lo que representa el 89,7 % del potencial teórico de la carga, valor superior al obtenido en la colada 1. Si se suman la cantidad de productos magnéticos obtenidos en el agua y el que quedó en el crisol supera el potencial teórico de la carga lo cual se debe a que el metal recuperado en el crisol está muy contaminado con escoria. Este aspecto se ratifica si se suman las cantidades de producto no magnético obtenidos en el vertido y el crisol donde ellos representan el 86 % del potencial teórico a obtener, lo cual deja claro que parte de estos productos están en las fracciones magnéticas.

En la tabla 3.6 se dan los resultados del proceso de trituración del metal colectado durante la colada 2.

Tabla 3.6 Distribución granulométrica del metal de carga II (segunda colada) vertido en agua y triturado manualmente

Tamaño (mm)	Carga (g)	%	% acumulado
$x > 5$	217	59,5	59,5
$5 \geq x > 3$	85	23,3	82,7
$3 \geq x > 2$	17	4,7	87,4
$2 \geq x > 1$	30	8,2	95,6
$x \leq 1$	16	4,4	100,0
Total	423	100,00	

En el caso de la distribución de los productos obtenidos en la segunda colada la mayor cantidad de producto se concentró en la fracción mayor a 5 mm, seguida de la fracción

$5 \geq x > 3$ y la fracción $2 \geq x > 1$. El comportamiento de estos productos difiere de la obtenida en el caso de la colada 1.

3.2.3 Carga Patrón + carbono (carga I). Tercera colada

En este caso la carga reportada en la tabla 2.2 del Capítulo 2 también fue formulada multiplicando por 5 todos los componentes. En la figura 3.9 se muestra una foto de los productos obtenidos, donde se puede observar que las granallas tienen forma irregular antes de la trituración y en la tabla 3.7 se muestran los resultados obtenidos en la colada.

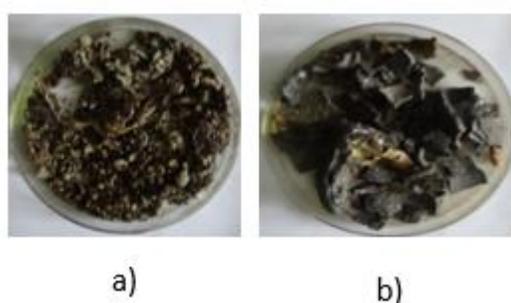


Figura 3.9 Metal vertido en agua (a) y dentro del crisol (b) de la tercera colada

Tabla 3.7 Resultados de la tercera colada.

Recolección	Producto	Masa	%
Vertido en agua	Magnético	278	83,2
	No magnético	56	16,8
	Total	334	100,0
Quedó dentro del crisol	Magnético	92	30,0
	No magnético	215	70,0
	Total	307	100

En la tabla 3.7 se observa que de los productos obtenidos en el vertido el 83 % son magnéticos y el 17 no magnéticos, valores que difieren de los obtenidos en la colada 1 de composición similar a esta y parecidos a los de la colada 2 de composición diferente ya que incluye escoria en la formulación. La escoria que se obtiene en el agua es muy frágil por lo que se tritura fácilmente facilitando su separación del metal. En este caso en el agua queda el 17,5 % del potencial de escoria de la carga.

En el agua se recolectan 278 g de metal lo que representa el 76 % del metal teórico de la carga y en el crisol quedan 92 g, si se suman ambas cantidades superan el potencial teórico de la carga, lo cual similar al caso anterior se debe a que el metal en el crisol es muy difícil de separar totalmente de la escoria.

En el caso de las escorias el mayor contenido quedó en el crisol (67 % del potencial) y pasaron al agua el 17,5 % del potencial, donde al igual que en el caso anterior no llega al 100 % del potencial teórico, lo que evidencia que el metal del crisol queda contaminado con escoria.

En la tabla 3.8 se ofrece la distribución granulométrica del metal de la tercera colada después de la trituración.

Tabla 3.8 Distribución granulométrica del metal de la carga I (tercera colada) vertido en agua y triturado manualmente

Tamaño (mm)	Carga (g)	%	% acumulado
$x > 5$	110	61,8	61,8
$5 \geq x > 3$	34	19,1	80,9
$3 \geq x > 2$	9	5,1	86,0
$2 \geq x > 1$	15	8,4	94,4
$x \leq 1$	10	5,6	100,0
Total (g)	178	100	

En el caso de la tercera colada, el comportamiento de la distribución granulométrica es muy parecida a la obtenida en la segunda colada independientemente a que las cargas no tienen la misma composición, pero en ambos casos se procesaron las cargas multiplicando cada componente por 5.

3.2.4 Carga Patrón + carbono (carga I). Cuarta colada

Esta carga representa una réplica de la anterior tanto en composición como en cantidad. En este caso el comportamiento del proceso de encendido y fusión reducción también fue adecuado. En la figura 3.10 se muestra una foto de los productos obtenidos y en la tabla 3.9 se ofrecen los resultados del procesamiento.

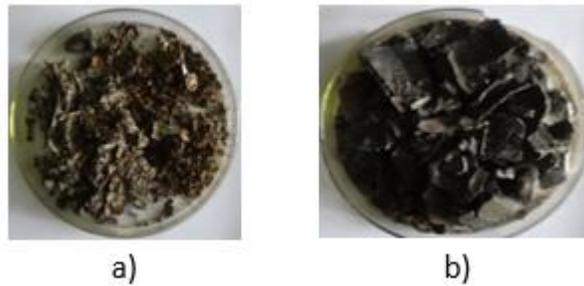


Figura 3.10 Metal vertido en agua a) y escoria b) que queda dentro del crisol de la cuarta colada.

Tabla 3.9 Resultados de la cuarta colada.

Recolección	Producto	Masa	%
Vertido en agua	Magnético	298	95,8
	No magnético	13	4,2
	Total	311	100,0
Quedó dentro del crisol	Magnético	80	32,9
	No magnético	163	67,1
	Total	243	100

En el caso de la cuarta colada la cantidad de metal que pasa a la cubeta de granulación es inferior a la obtenida en la colada anterior (de composición y cantidad similar) y la que queda en el crisol es inferior y por otro lado la cantidad de escoria que pasa al agua es inferior al caso anterior, lo cual puede estar relacionado a las condiciones del vertido.

En la tabla 3.10 se ofrecen los resultados del proceso de trituración del metal.

Tabla 3.10 Distribución granulométrica del metal de la carga I (cuarta colada) vertido en agua y triturado manualmente

Tamaño (mm)	Carga (g)	%	% acumulado
$x > 5$	153	51,3	51,3
$5 \geq x > 3$	80	26,8	78,2
$3 \geq x > 2$	18	6,0	84,2
$2 \geq x > 1$	31	10,4	94,6
$x \leq 1$	16	5,4	100,0
Total	298	100	

En este caso la distribución granulométrica es similar a la obtenida en los dos casos anteriores, donde la mayor cantidad de producto se concentra en las dos, primeras fracciones.

3.2.5 Carga Patrón + carbono (carga I). Quinta colada

Esta carga representa una tercera réplica de la formulación número I, la cual también se comportó de forma satisfactoria. En la figura 3.11 se muestra una foto de los productos obtenidos en el vertido, donde se puede observar que el metal también se obtiene de manera muy irregular, pero siempre mantiene el brillo metálico.

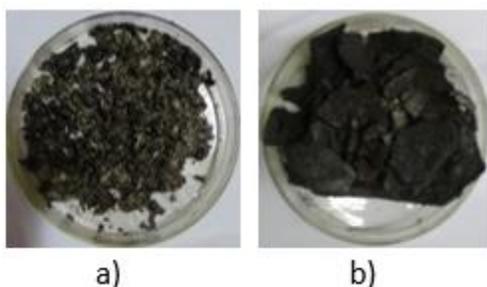


Figura 3.11 Metal vertido en agua (a) y escoria del crisol (b)

En la tabla 3.13 se reportan los resultados de la colada.

Tabla 3.11 Resultados de la quinta colada.

Recolección	Producto	Masa	%
Vertido en agua	Magnético	283	87,3
	No magnético	41	12,7
	Total	324	100,0
Quedó dentro del crisol	Magnético	95	28,5
	No magnético	238	71,5
	Total	333	100

En la colada 5 se obtienen resultados con un comportamiento muy parecido a los obtenidos en las coladas 3 y 4, la mayor diferencia está en la cantidad de escoria que sale del crisol lo cual debe estar relacionado a las características del vertido ya que el mismo no siempre se realiza en las mismas condiciones, sobre todo por lo complejo que resulta establecer el momento de realizar el vertido una vez concluida la alimentación del reactor.

Tabla 3.12: Distribución granulométrica del metal de la carga I (quinta colada) vertido en agua y triturado manualmente

Tamaño (mm)	Carga (g)	%	% acumulado
$x > 5$	179	63,3	63,3
$5 \geq x > 3$	58	20,5	83,7
$3 \geq x > 2$	14	4,9	88,7
$2 \geq x > 1$	20	7,1	95,8
$x \leq 1$	12	4,2	100
Total	283	100	

En la figura 3.12 se ofrecen los resultados de la distribución granulométrica del metal de la quinta colada, donde se puede observar que se mantiene una tendencia semejante a la obtenida en los casos anteriores, por lo que se grafican los resultados obtenidos para cada una de las coladas. Los resultados de la distribución granulométrica se muestran en la figura 3.12 y el porcentaje acumulado en la figura 3.13.

Al analizar la figura 3.12 se puede observar que las cuatro coladas evaluadas vertiendo el fundido directamente sobre el agua tienen un comportamiento similar para cada una de las fracciones, concentrándose la mayor cantidad de producto en la fracción superior a 5 mm (entre 51 -60 %), seguida de la fracción $5 \geq x > 3$, (entre 19 -27 %) y la fracción $2 \geq x > 1$ (de 7 -10 %). Las fracciones $3 \geq x > 2$ y $x \leq 1$ tienen granulometrías muy parecidas.

La colada 1, vertida sobre la canal tiene un comportamiento diferente al resto de las coladas, de manera general la curva de distribución granulométrica para esta colada no coincide con las curvas obtenidas para el resto de las coladas. En este caso la mayor concentración de producto se encuentra en la fracción $5 \geq x > 3$. Este comportamiento puede estar relacionado con las condiciones de enfriamiento ya que el fundido de la colada uno va desde el reactor a la canal y de la canal al agua y para el resto de las coladas va directamente del reactor al agua en movimiento.

En el caso del porcentaje acumulado ocurre algo similar, la curva obtenida para la colada 1 difiere del resto de las curvas.

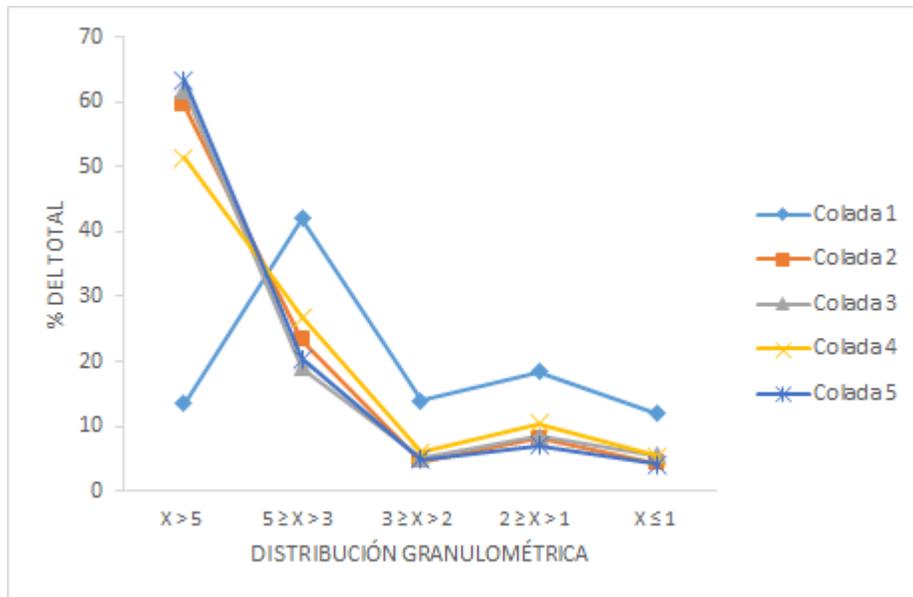


Figura 3.12 Distribución granulométrica de las coladas vertidas en agua

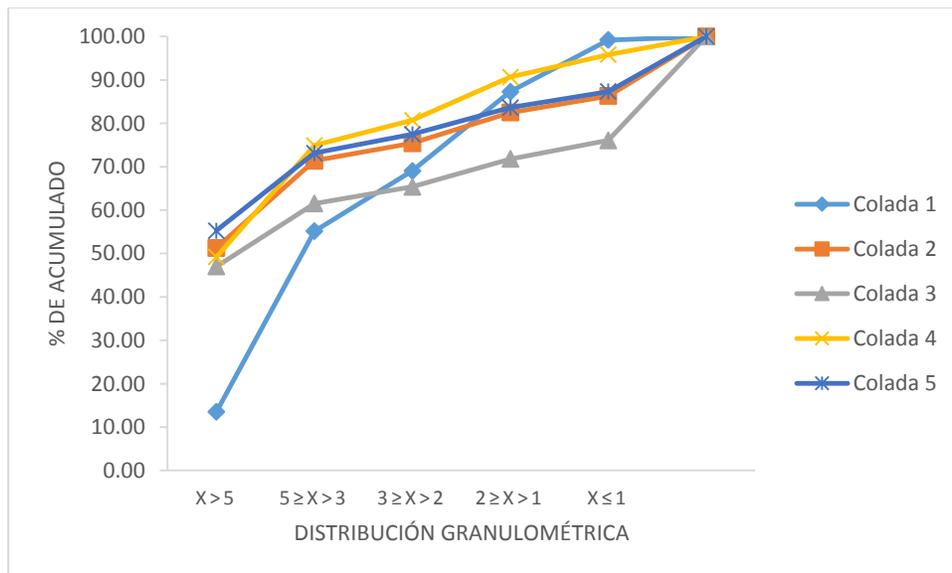


Figura 3.13 % de acumulado de las coladas vertidas en agua

Conclusiones

1. El agitador mecánico diseñado y construido genera un régimen turbulento dentro de la cubeta de vertido lo cual contribuye a la granulación del metal fundido.
2. Para la evaluación del agitador mecánico se utilizaron dos formulaciones de carga las que se comportaron de manera satisfactoria en todos los casos, lográndose verter del crisol más del 79 % del metal teórico a producir, quedando en el crisol más del 70 % del potencial de escoria.
3. La realización del vertido directamente en agua evita que quede metal retenido sobre la canal afectando la eficiencia del proceso.
4. Durante el proceso de vertido y granulación del metal, directamente en agua, se obtienen granallas metálicas donde la mayor cantidad de productos se concentra en la fracción superior a 5 mm (entre 51 - 60 %), seguida de la fracción $5 \geq x > 3$, (entre 19 - 27 %) y la fracción $2 \geq x > 1$ (de 7 - 10 %).

Recomendaciones

1. Evaluar el comportamiento del agitador mecánico mediante la realización de un mayor número de experimentos.

Referencias Bibliográficas

- ABRASIVOS, M. C. D. 2000. Tecnología para limpieza, tratamiento y acabado de superficies.
- CASTELLÓ, T., MARTÍN HERNÁNDEZ, J. M. & LÓPEZ GÓMEZ, M. I. 2010. *Procedimiento de obtención de esponjas metálicas*. España patent application.
- CASTELLS, X. E. 2012. *Reciclaje de residuos industriales: residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*, Ediciones Díaz de Santos.
- DÍAZ MARTÍNEZ, J. I. 2016. *Obtención de aleaciones de hierro y escorias abrasivas y refractarias a partir del procesamiento aluminotérmico de cascarillas de laminación*. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Departamento de Ingeniería Mecánica.
- ELLINGHAM, H. J. T. 1944. *J. Soc. Chem. Ind.*, London.
- FORN, M. 2018. Tipos de granalla de acero y criterios de selección. *Surfas press: revista del tratamiento de superficies*, 34-36.
- FRANQUESA I VONESCHEN, M. 2009. *Introducción a la teoría de las turbinas eólicas*.
- GIL, P. P., YUSTA, I., ORUE-ETXEBARRIA, X., HERRERO, J. M., BACETA, J. I., ARTARAZ, J., MADINA, E. & MINTEGUI, J. M. 2008. Caracterización Mineralógica y Química de Escorias de Ferrerías de Monte (“haizeo-las”) en el Entorno de Galdakao (Vizcaya).
- GÓMEZ RÍOS, I. 2015. *Aprovechamiento de residuales industriales para la obtención de aleaciones de hierro y escorias*. Tesis de Master, UCLV.
- GONZALES, M. C., BARRIOS, D. B., ÂNGELO, E. & GONÇALVES, E. 2006. Análisis tridimensional del proceso de granallado utilizando un modelo de múltiples impactos. //3d shot peening process analysis using multiple impacts model. *Ingeniería Mecánica*, 9, 29-36.

- GONZÁLEZ, Y. V. 2016. *Obtención de una aleación de Fe-Mn-C a partir del procesamiento aluminotérmico de residuos industriales*. Tesis de Grado, INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ.
- GUALDA CONTRERAS, I. 2012. *Mejoras en el Proceso de Desoxidación de Acero en Horno de Inducción*. Universidad de Cantabria.
- HUERTO BUJAICO, H. O. 2013. *Estudio del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB Con Superficie Libre Mediante El Programa ANSYS CFX V.14.0*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- HUFNAGEL, W. 1992. *Manual del aluminio*, Reverté.
- ISPJAE 2015. NC-29 NBI. AJUSTES Y TOLERANCIAS. ZONAS DE TOLERANCIA Y AJUSTES PARA LAS DIMENSIONES MENORES DE 3150 MM
- NC 02-23-01 SUDP. FORMATOS Y REPRESENTACION DE PLANOS. Cuca.
- MCCANN, M. 2010. *INDUSTRIAS MANUFACTURERAS*.
- ORTEGA, R. H. 2015. Tablas de Diseño de Elementos de Máquinas. *In: EM, T. D. (ed.)*. Cuba.
- PÉREZ, G., BARRERO, C., MORALES, A., TOBON, J., GARNACHE, O., RODRÍGUEZ, C. & ARROYAVE, C. 2003. Óxidos de hierro relacionados con la corrosión: hematitas dopadas con Cu, Mn y Cr. *Revista de Metalurgia*, 39, 68-71.
- ROBERT L.MOTT, P. E. 2006. *Diseño de Elementos de Máquinas*.
- RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, E., PERDOMO-GONZÁLEZ, L. & QUINTANA-PUCHOL, R. 2018. Obtención y caracterización de una termita base para soldar aceros. *Minería & Geología*, 14, 29-32.
- RODRÍGUEZ, E. A. 2015-2016. *Fabricación y evaluación de un dispositivo para ensayos de erosión húmeda*. UCLV.

SCHAMES, I. H. 1995. *Mecánica de Fluidos*

Colombia.

STREETER, V., WYLIE, E. & BEDFORD, K. 1998. *Fluid Mechanics*, „McGraw-Hill. *New York*.

STREETER, V. L. 1999. *Mecánica de Fluidos*. Colombia.

UCI 2016. *Ecured*. *Ecured*. Cuba, Holguín.

URIBE, V. C. 2013. *Diseño Y Cálculo de un Agitador de Fluidos*. Universidad del Bío-Bío.

WALES, J. & SANGER, L. 2001. *Wikipedia*. *Wikipedia*. Estados Unidos.

Anexos

Anexo 1 Valores de las revoluciones del agitador versus número de Reynolds obtenidos mediante el software Excel siguiendo una progresión geométrica empírica $(10 + n)^{exp}$.

Reynolds	exp	n	RPS	RPM
10000	4	0	0,06679	4,007194
15377,15975	4,1	0,5	0,103	6,161926
23650,98745	4,2	1	0,158	9,477409
36391,5634	4,3	1,5	0,243	14,5828
56027,01472	4,4	2	0,374	22,45111
86316,74575	4,5	2,5	0,576	34,58879
133088,1599	4,6	3	0,889	53,331
205384,9951	4,7	3,5	1,372	82,30175
317259,4531	4,8	4	2,119	127,132
490572,5131	4,9	4,5	3,276	196,5819
759375	5	5	5,072	304,2963
1176770,196	5,1	5,5	7,859	471,5546
1825676,855	5,2	6	12,193	731,5841
2835730,174	5,3	6,5	18,939	1136,332
4409853,637	5,4	7	29,452	1767,114
6866086,458	5,5	7,5	45,856	2751,374
10703505,3	5,6	8	71,485	4289,102
16706245,22	5,7	8,5	111,575	6694,516
26107836,58	5,8	9	174,365	10461,92

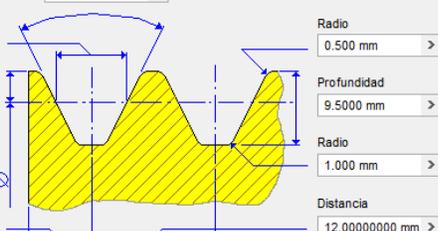
Anexo 2 Valores obtenidos mediante el software Excel de las fuerzas de sustentación y arrastre para diferentes velocidades.

Fuerza de arrastre	Fuerza de Sustent	rpm del agitador	V
0,000180517	0,002707753	5,542453196	0,09576694
0,000426845	0,006402672	8,522718821	0,14726235
0,001009756	0,015146335	13,1084491	0,22649827
0,002390668	0,035860013	20,16985369	0,34851087
0,005666472	0,084997074	31,05271068	0,53655358
0,013449554	0,201743303	47,84065234	0,82662906
0,031973972	0,479609582	73,76348975	1,27454459
0,076147417	1,142211251	113,8336722	1,96690926
0,181696639	2,725449581	175,839567	3,03829671
0,434434366	6,516515487	271,8975193	4,69806286
1,040951131	15,61426696	420,8800396	7,27230203
2,499775873	37,4966381	652,2193736	11,2695681
6,016799927	90,2519989	1011,872852	17,4839486
14,51602005	217,7403008	1571,690176	27,1569202
35,10476755	526,5715132	2444,140738	42,231819
85,10131801	1276,51977	3805,496283	65,7544092
206,8091778	3102,137666	5932,367718	102,504195
503,8200591	7557,300887	9259,358223	159,990599
1230,437396	18456,56094	14470,14623	250,026763
3012,493821	45187,40732	22641,55453	391,218892
1,805168518	27,07752776	554,2453196	9,57669403
913,2086178	13698,12927	12466,02977	215,398035
2529,241206	37938,61808	20746,18677	358,469212
0,761585529	11,42378294	360	6,220368
3,575220957	53,62831436	780	13,477464
12,5090482	187,6357229	1459	25,2097692

Anexo 3 Resultados obtenidos con el software Inventor 2016 del diseño de las poleas (polea conducida y polea conductora).

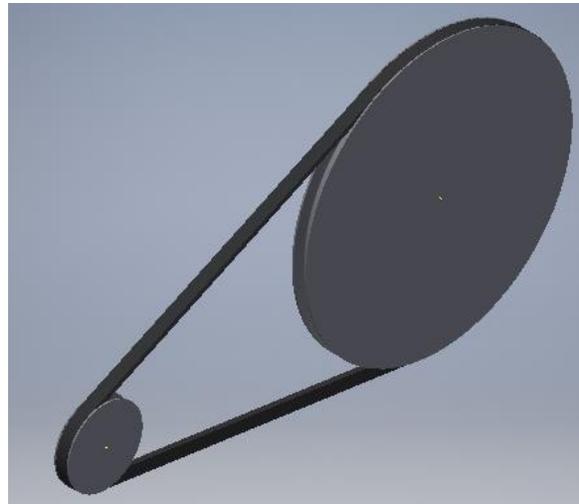
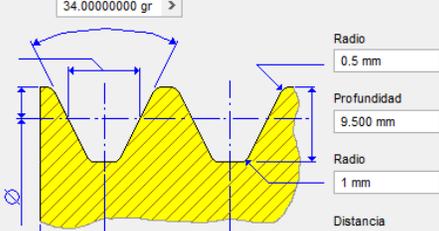
Guía de diseño		Coficiente de potencia		Coficiente de fricción	
Diámetro	1.000 su	1.000 su	0.350 su		
<input checked="" type="checkbox"/> Tamaño personalizado					
<input type="checkbox"/> Número de ranuras personalizado					

Cotas	
Número de ranuras	1.000 su
Ángulo de acanalado	34.00000000 gr
Anchura	11.000 mm
Radio	0.500 mm
Altura	2.500 mm
Profundidad	9.5000 mm
Radio	1.000 mm
Diámetro	300 mm
Distancia	8.00000000 mm

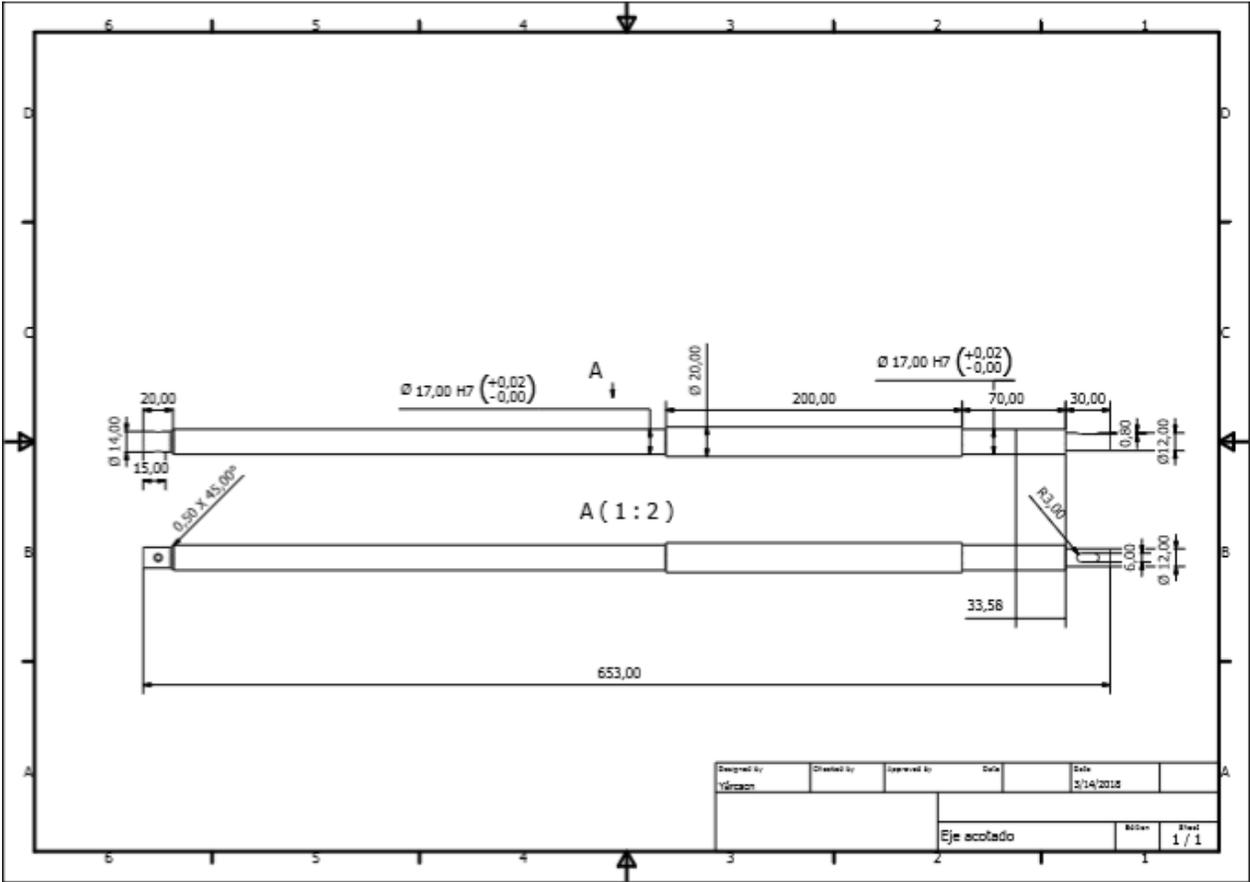


Guía de diseño		Coficiente de potencia		Coficiente de fricción	
Diámetro	1.000 su	1.000 su	0.350 su		
<input checked="" type="checkbox"/> Tamaño personalizado					
<input type="checkbox"/> Número de ranuras personalizado					

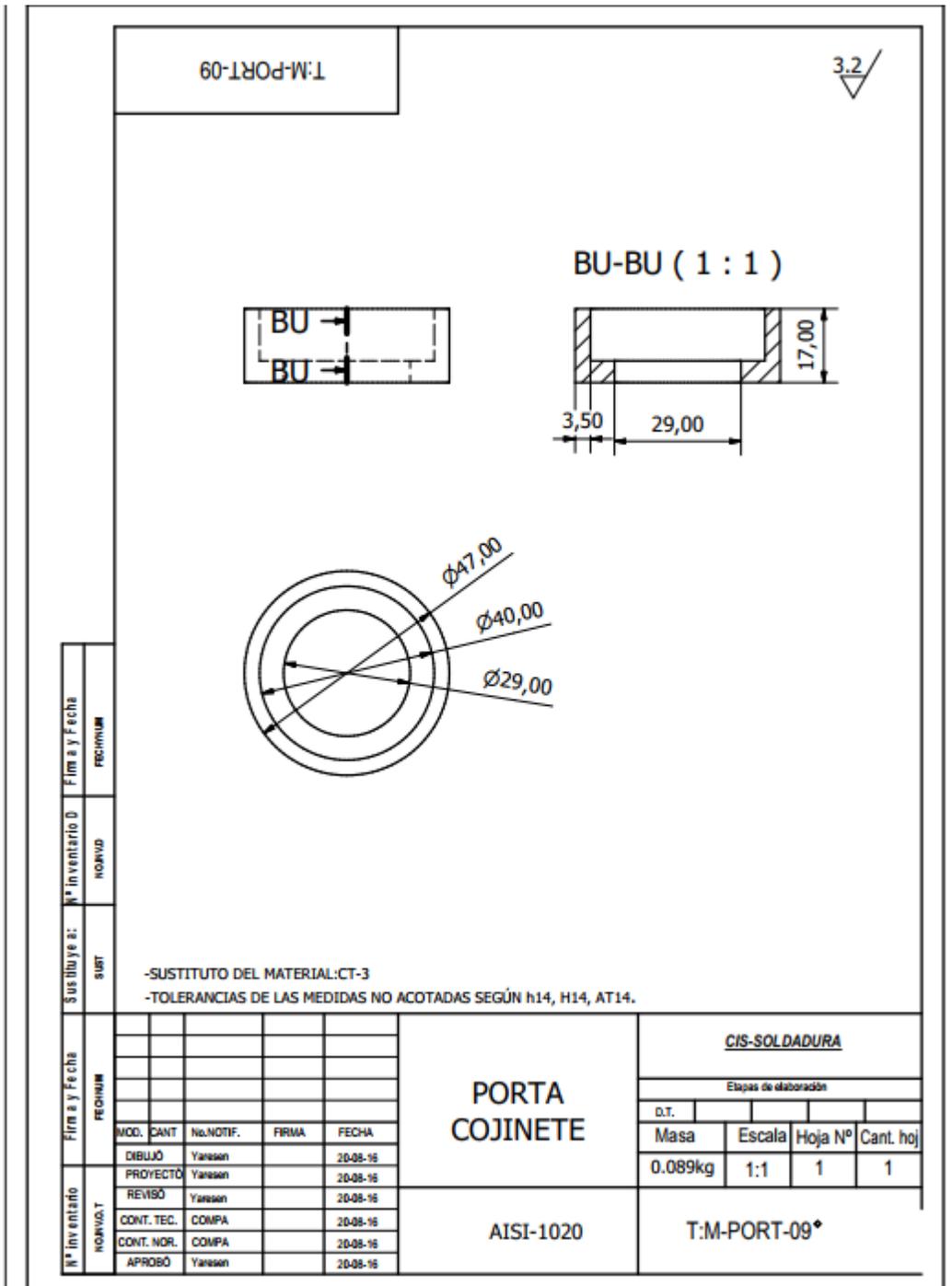
Cotas	
Número de ranuras	1.000 su
Ángulo de acanalado	34.00000000 gr
Anchura	11.000 mm
Radio	0.5 mm
Altura	2.500 mm
Profundidad	9.500 mm
Radio	1 mm
Diámetro	80 mm
Distancia	8.00000000 mm



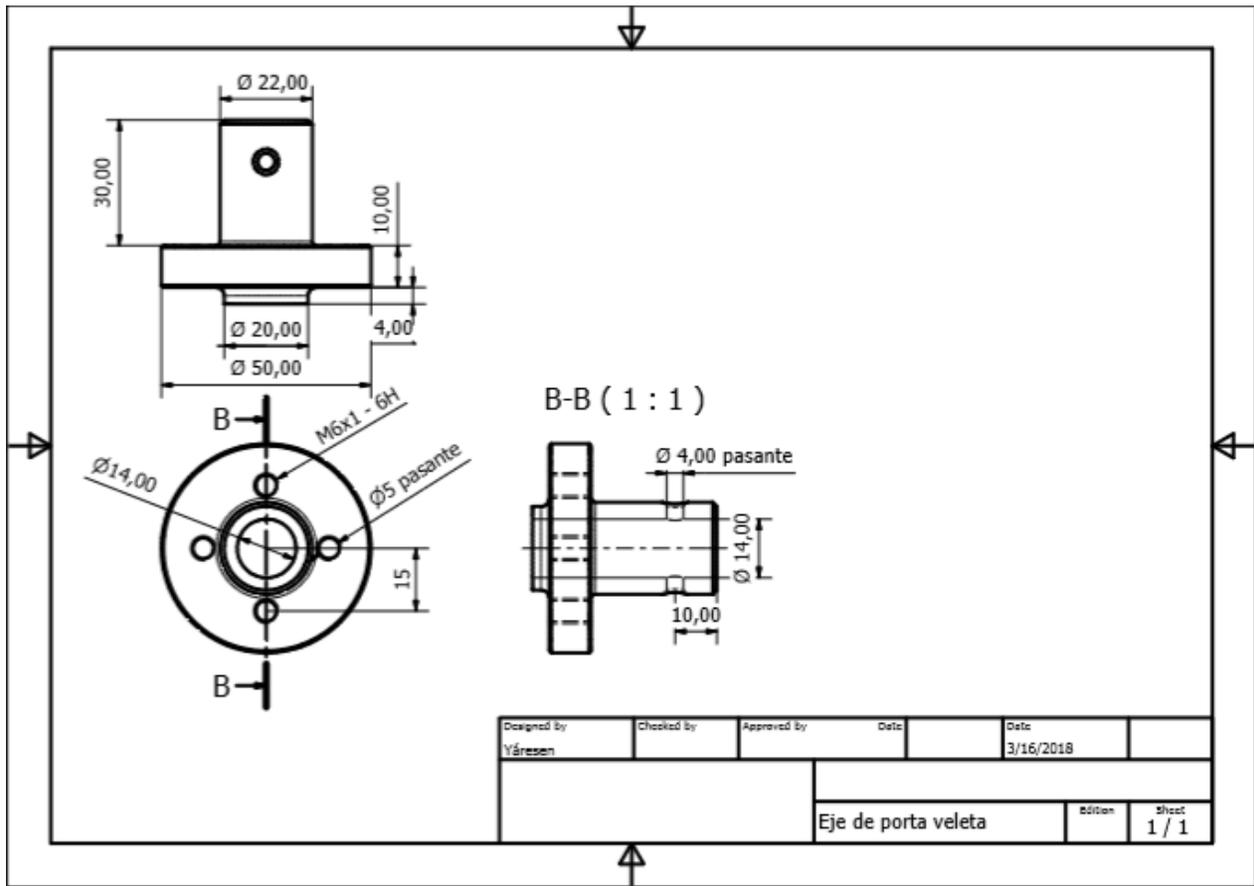
Anexo 4



Anexo 5



Anexo 6



Anexo 7

