

DISEÑO Y MEJORA DE LAS PALETAS DE TURBINA PARA MÁQUINA
GRANALLADORA A TRAVÉS DEL SOFTWARE SOLIDWORKS

ARMANDO JOSÉ SOLÓRZANO VANEGAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

DISEÑO Y MEJORA DE LAS PALETAS DE TURBINA PARA MÁQUINA
GRANALLADORA A TRAVÉS DEL SOFTWARE SOLIDWORKS

ARMANDO JOSÉ SOLÓRZANO VANEGAS

*Trabajo de grado, modalidad: proyecto de investigación para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico*

Director

SANDRA JUDITH GARCIA VERGARA

Doctora en Ingeniería de Materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mi padre, Armando José Solórzano Dangon y a mi madre, María Eugenia Vanegas Armenta por amarme y estar ahí por mí siempre que los necesité en este largo camino, ya que sin ellos este logro no hubiese sido posible. A mi hermano y mejor amigo, Juan David Solórzano Vanegas por todo el cariño que me ha brindado hasta el día de hoy que ha sido incondicional.

También quiero dedicar este logro a mis tías, Idalides Vanegas Armenta, Ana Vanegas Armenta, Maribel Vanegas Armenta, Liliana Vanegas Armenta por ser otras madres para mí y apoyarme en todo. A mis primos Luis Ángel Vanegas, Leonardo Vanegas y Fernando Vanegas (Q.E.P.D) por brindarme su sabiduría ya que sin ellos como hermanos mayores no sería la persona que soy ahora.

Este logro está dedicado también a mis amigos de siempre, Susan Natacha contreras, José Julián niño, Wilman Yesid Ardila, Cristian David Echeverry y Juan Felipe Rangel por ser mi familia en este largo proceso. A mi novia Luisa Fernanda Segura Viviescas por ser mi luz todos los días y estar ahí siempre que la necesito.

A mi directora de proyecto y profesora de escuela Sandra Judith Vergara por dejarme hacer parte de su equipo de trabajo, por su apoyo y porque a pesar de la adversidad siempre pude contar con ella en cualquier circunstancia.

Y, por último, pero no menos importante a mis amigos y compañeros de carrera, Frank, Leyner, pablo, Andrea Osuna, Sergio Lorica, Juanjo, Luijo y Nestor por hacer de este camino más fácil de andar.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los profesores que de una u otra manera aportaron en mi formación como ingeniero y me motivaron a ser cada vez mejor.

Al profesor Pedro Luis Delvasto y al profesor Sergio Blanco porque además de formarme como ingeniero encontré en ellos una mano amiga.

Al Profesor Walter pardavé por tenerme en cuenta siempre en sus actividades y por ser un profesor diferente.

Al profesor Carlos Galan (zapatoco) por enseñarme que para ser un excelente profesor no se necesitan títulos si no vocación.

Al profesor Mauricio Rincon y al profesor Andres Gonzales por tener siempre la mejor disposición siempre que los necesité.

Al ingeniero Henson Alberto Medina porque ser el capitán de este proyecto, por su apoyo y conocimiento aportado y sobre todo por su amistad.

A los Técnicos, Mario, Ambrosio, Oscar, Javier, Domingo y Sergio por ayudarme en cada una de las disciplinas necesarias en esta carrera.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO TEORICO	16
1.1 GRANALLADO	16
1.1.1 Descripción general de la turbina.....	16
1.1.2 Tipos de turbina.	17
1.2 GRANALLA O ABRASIVO PARA LIMPIEZA MECÁNICA	18
1.2.1 Tipos de abrasivo para limpieza.	18
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	21
3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO CONCEPTUAL	21
3.1.1 Diseño Geométrico.	21
3.1.2 Criterio de selección de material.....	22
3.2 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA Y SIMULACIÓN	23
3.2.1 Creación de piezas.	23

3.2.2 Ensamblaje.	24
3.3 SIMULACIÓN.....	24
3.3.1 Creación de Volumen de control.....	24
3.3.2 Construcción de tapas (Lids).	25
3.3.3 Inicio de la simulación por flow simulation: Wizard.	26
3.3.4 Reconocimiento de volumen de control externo.	26
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	28
4.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS TRES TIPOS DE PALETAS	28
1.1 Sistema de paletas planas.	28
4.1.2 Sistema de paletas en espiral.	29
4.1.3 Sistema de paletas intercambiables con riel y perfil en espiral.	31
4.2 ESTUDIO ESTÁTICO PARA ACERO DE HERRAMIENTA A2 Y FUNDICIÓN GRIS CLASE 120	32
4.2.1 Tensiones en acero de herramienta A2.	33
4.2.2 Desplazamientos en acero de herramienta A2.	33
4.2.3 Factor de seguridad en acero de herramienta A2.	34
4.2.4 Tensiones en fundición gris clase 120.	35
4.2.5 Desplazamientos en fundición gris clase 120.	35
4.2.6 Factor de seguridad en la fundición gris clase 120.	36

5. CONCLUSIONES	38
6. RECOMENDACIONES.....	39
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	40
BIBLIOGRAFIA.....	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes de la turbina de granallado	17
Figura 2. (a) Turbina de paletas intercambiables (7). (b) Turbina monoblock (4). .	17
Figura 3. Forma permisible de granalla	19
Figura 4. (a) Fuerza de impulso debido al cambio de baja velocidad. (b) Fuerza de impulso debido al cambio de dirección de velocidad	22
Figura 5. Planos de los tres sistemas de paletas seleccionadas para diseño. Unidad de medida milímetros. (a) Paleta plana. (b) Paleta en espiral y (c) Paleta con riel y en espiral.....	23
Figura 6. Esquema del ensamblaje de la turbina para granallado de plateas intercambiables.....	24
Figura 7. Esquema mostrando el volumen de control delimitado (área en color rojo)	25
Figura 8. Esquema mostrando el ensamblaje del sistema con tapas (Lids).	25
Figura 9. Esquema mostrando el volumen de control externo.....	26
Figura 10. (a) Esquema de la tapa de entrada. (b) Esquema de la tapa de salida.	27
Figura 11. Esquema mostrando la selección de la región rotativa.....	27
Figura 12. Distribución de flujo en el sistema de paletas planas (presión).	28
Figura 13. Distribución de flujo en el sistema de paletas planas (velocidad de salida de la granalla).....	29
Figura 14. Distribución de flujo en el sistema de paletas en espiral (presión)	30
Figura 15. Distribución de flujo en el sistema de paletas en espiral (velocidad de salida de la granalla).....	30
Figura 16. Distribución de flujo en el sistema de paletas con riel y perfil en espiral (presión).....	31

Figura 17. Perfil Distribución de flujo en el sistema de paletas con riel y perfil en espiral (velocidad de salida de la granalla)..	31
Figura 18. Cargas aplicadas.	33
Figura 19. Tensiones registradas en las paletas cuando son fabricadas con un acero de herramientas A2, escala 1:2.	33
Figura 20. Desplazamientos resultantes cuando las paletas son fabricadas con un acero de herramientas A2, escala 1:2.	34
Figura 21. Factor de seguridad del Acero de herramienta A2, escala 1:2.	34
Figura 22. Tensiones registradas cuando las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120, escala 1:2.	33
Figura 23. Desplazamientos resultantes cuando las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120, escala 1:2.	34
Figura 24. Factor de seguridad cuando las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120, escala 1:2.	36

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y MEJORA DE LAS PALETAS DE TURBINA PARA MÁQUINA GRANALLADORA A TRAVÉS DEL SOFTWARE SOLIDWORKS*

AUTORES: Solórzano Vanegas, Armando José**

PALABRAS CLAVES: Granallado, Turbina para granalladora, Simulación, Solidworks.

DESCRIPCIÓN: En este trabajo se diseñaron tres tipos de paletas que fueron sometidas a un conjunto de simulaciones para evaluar su eficiencia en el proceso de granallado por turbina. El sistema que se evaluó fue una granalladora centrífuga con paletas intercambiables, con diámetro exterior de 280 mm. Para ello se realizó el diseño del perfil geométrico de tres tipos de paletas intercambiables sin cambiar las posiciones de tipo 8 paletas con ángulos de distribución igual en los 360° de la geometría de la canasta. Para ello fue necesario realizar la identificación de los parámetros de entrada al software de ingeniería asistida por computadora Solidworks. Se calculó la velocidad de rotación y el tipo de motor teniendo en cuenta que la velocidad de salida de la granalladora óptima, la cual está entre 70 y 80 m/s y por ende el motor que correspondía para este proceso es un motor de 75 HP y rotación de 3600 rpm. Este sistema se evaluó por medio de una simulación de partículas a través del solver de Solidworks utilizando una granalla del tipo AS-280. Los resultados obtenidos mostraron como el comportamiento estructural mecánico del sistema fue mejor en las paletas de forma cóncava ya que estas presentaron un mejor desempeño del proceso de granallado y esto se vio reflejado en las velocidades de salida mayores en comparación a la paleta plana.

*Proyecto de grado, modalidad investigación

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Doctora en ingeniería de materiales, Sandra Judith García Vergara

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPROVEMENT OF TURBINE PALLETS FOR GRANULAR MACHINE THROUGH SOLIDWORKS SOFTWARE*

AUTHORS: Solórzano Vanegas, Armando José**

KEYWORDS: Shot blasting, Shot blasting turbine, Simulation, Solidworks

DESCRIPTION: In this work, three types of pallets were designed that were subjected to a set of simulations to evaluate their efficiency in the process of blasting by turbine. The system that was evaluated was a centrifugal blasting machine with interchangeable blades, with an external diameter of 280 mm, for which the design of the geometric profile of three types of interchangeable blades was made without changing the positions of type 8 blades with equal distribution angles in the 360 ° of the geometry of the basket. For this it was necessary to carry out the identification of the input parameters to the computer-aided engineering Solidworks. The speed of rotation and the type of engine were calculated bearing in mind that the output speed of the optimum blasting is between 70 and 80 m / s and therefore the engine that corresponded for this process was a 75 HP motor, and rotation of 3600 rpm. This system was evaluated by means of a particle simulation through Solidworks solver using a shot of the AS-280. The results obtained showed how the mechanical structural behavior of the system was better in the concave blades, because they presented a better performance of the blasting process and this was reflected in the higher output speeds compared to the flat blades.

* Degree Project, research modality

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Doctora en ingeniería de materiales, Sandra Judith García Vergara

INTRODUCCIÓN

Las propiedades más importantes de los materiales como lo son la resistencia mecánica, características químicas, dureza, resistencia, tenacidad, resistencia al desgaste o a la corrosión, etc., están involucradas directamente con su superficie. Por eso es de suma importancia el conocimiento y estudio de las superficies en particular [1].

Los componentes metálicos o no metálicos que se encuentran sometidos a cargas cíclicas son más propensos a presentar fallas por corrosión bajo esfuerzos y suelen ser sometidos a un proceso de granallado. El granallado es el proceso más utilizado industrialmente para modificar la superficie de los materiales [2]. El granallado por turbina de paletas intercambiables es la forma más sencilla de implementar este proceso en las plantas industriales, ya que en comparación con las turbinas monoblock, presentan un menor costo debido a que el costo del recambio de un juego de paletas es más económico que la reposición de una rueda fundida [3]. Sin embargo, si las paletas se cambian con mucha frecuencia, y además se alteran los ciclos de trabajo, la rueda mecanizada puede dañarse y el cambio de la misma aumenta considerablemente el costo del equipo [3]. Así mismo, aumentan los costos de operación y mantenimiento. Las fallas en las paletas por lo general son ocasionadas por la mala operación de la máquina y la interacción entre el material abrasivo y las paletas. De ahí que el diseño y la selección del material de las paletas jueguen un papel fundamental ya que de ellos dependerá su durabilidad. En base a lo descrito, surge la necesidad de realizar un análisis que permita identificar las variables y parámetros de diseño que afectan las paletas, con el fin de reducir o eliminar estas fallas. Elaborar un diseño físico de las paletas puede generar sobrecostos, sin tener cálculos previos que aseguren un óptimo funcionamiento de la máquina y del proceso, por esto una simulación a

través de un software de elementos finitos como Solidworks es una alternativa prometedora.

El propósito de este trabajo de grado es utilizar Solidworks para diseñar tres distintos sistemas de paletas, además de modelar estas piezas y conjuntos que fueron a varias series de simulaciones con el fin de poner a prueba el sistema de turbinas, calcular la velocidad de salida de las partículas, la presión ejercida por estas en la carcasa de granallado y evaluar el material de fabricación de las paletas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 GRANALLADO

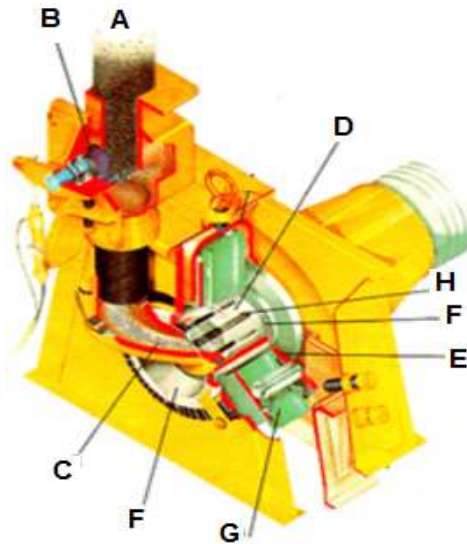
El granallado es un proceso utilizado para la limpieza de la superficie de los materiales por medio de un bombardeo de partículas abrasivas a una alta velocidad (70-80 m/s) [4]. Este flujo de partículas conocido como granalla al hacer contacto con la superficie del material remueve los contaminantes o impurezas que se encuentran a nivel superficial generando un excelente acabado superficial.

En los equipos de granallado las piezas son tratadas en el interior de una cabina, donde son sometidos al material abrasivo, el cual puede ser proyectado por una o más turbinas. La eficiencia de las turbinas dependerá de las dimensiones de las paletas y el tipo de granalla que se utilice, y esto influirá drásticamente en el proceso y en el acabado superficial final [5].

1.1.1 Descripción general de la turbina. La turbina es el componente principal de las cabinas de granallado. La turbina arroja la granalla metálica y mediante un efecto centrífugo esta es proyectada sobre la superficie de la pieza, a una velocidad directamente proporcional a la velocidad de la turbina como se muestra en la Figura 1.

En la turbina, la granalla (A) pasa por la válvula reguladora (B) y cae por gravedad a través del tubo de alimentación de la turbina (C). La rueda distribuidora (D) acelera la granalla a una velocidad muy cercana a la de la rueda centrífuga (E). La granalla es direccionada por la jaula de control (F) enviándola a las paletas (G) (Figura 1) [6].

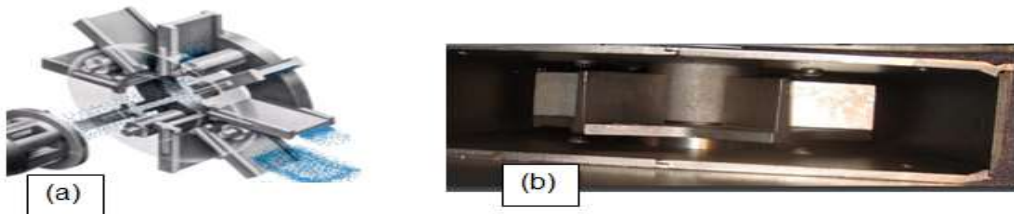
Figura 1. Partes de la turbina de granallado [6].



Fuente: **WATANABE, T.** El proceso de granallado. [En línea] [Citado el: 29 de Enero de 2018.] http://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/granalhas/grana_esp.pdf.

1.1.2 Tipos de turbina. Las turbinas de granallado pueden ser de paletas intercambiables (Figura 2(a)) o de ruedas monoblock (Figura 2(b)). Ambos tipos de turbina de granallado poseen giro bi-direccional, permitiendo la instalación de la turbina en cualquier tipo de equipo o posición, ya que este permite trabajar en ambos sentidos sin necesidad de modificar las paletas o la rueda [4].

Figura 2. (a) Turbina de paletas intercambiables. (b) Turbina monoblock [4].



Fuente: **WATANABE, T.** El proceso de granallado. [En línea] [Citado el: 29 de Enero de 2018.] http://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/granalhas/grana_esp.pdf.

Aunque las ruedas monoblock son más livianas en comparación a las turbinas de paletas intercambiables y requieren menor potencia para hacer girar la rueda de las turbinas de paletas intercambiables, presentan un menor costo debido a que el costo del recambio de un juego de paletas es más económico que la reposición de una rueda fundida [4]. Sin embargo, si las paletas se cambian con mucha frecuencia, y además se alteran los ciclos de trabajo, la rueda mecanizada puede dañarse y el cambio de la misma aumenta considerablemente el costo del equipo [5]. Así mismo, muchos cambios de las paletas aumentan el tiempo de producción y con esto los costos de operación y mantenimiento. Las fallas en las paletas por lo general son ocasionadas por la mala operación de la máquina y la interacción entre el material abrasivo y las paletas.

1.2 GRANALLA O ABRASIVO PARA LIMPIEZA MECÁNICA

Los abrasivos para procesos de limpieza mecánica pueden desgastar los componentes internos de la turbina, por esto es necesario escoger bien el tipo de granalla que se va a utilizar. La granalla debe limpiar con rapidez para ser efectiva a la hora de interactuar con el material y así generar un acabado superficial uniforme [8].

1.2.1 Tipos de abrasivo para limpieza. Existen varios tipos de abrasivos para limpieza, se dividen en metálicos y no metálicos. Los abrasivos pueden utilizarse en una misma aplicación de ser necesario, pero deben escogerse cuidadosamente. Los tipos de granalla más comunes son: granalla de acero, granalla de acero inoxidable, granalla de acero al carbono, óxido de aluminio, micro esferas de vidrio, cascara de nuez, bicarbonato de sodio y carburo de silicio [8].

La limpieza por granalla debe hacerse con partículas esféricas de área igual o menores a 161 mm [9]. La Figura 3(a) muestra la forma permisible de granalla, la

cual tiene un área de 161 mm² y radio de 3.57 mm. [10]. La Figura 3(b), muestra las especificaciones de la geometría de varios tipos de granalla para limpieza.

Figura 3. (a) Forma permisible de granalla, escala 2:1 [6]. (b) Especificaciones granulométricas de la geometría de la granalla.



(b)

TIPO	Área (mm ²)	Número de partículas con forma marginal	Número de partículas con forma inaceptable
AS* 930	645	8	2
AS* 780	645	12	2
AS* 660	645	16	3
AS* 550	645	20	4
AS* 460	645	28	5
AS* 390	645	39	7
AS* 330	161	14	3
AS* 280	161	20	4
AS* 230	161	14	5
AS* 190	161	20	7
AS* 170	161	28	10
AS* 130	161	10	4
AS* 110	40	14	5
AS* 70	40	39	13

(*) ASH: Dureza comprendida entre 55 y 62 HRC.

Fuente: **TORRES JARAMILLO, S.** *Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para unidad de mantenimiento y transporte.* Sangolquí : Editorial ESPE, 2013. pág. 20.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y mejorar las paletas de turbina para una máquina granalladora a través del software Solidworks.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los parámetros y variables de diseño de las paletas de la turbina.
- Diseñar la paleta de la turbina de la máquina granalladora a partir de los parámetros y variables de diseño.
- Simular el diseño de la paleta de turbina a través del software solidworks.

3. DESCRIPCIÓN EXPERIMENTAL

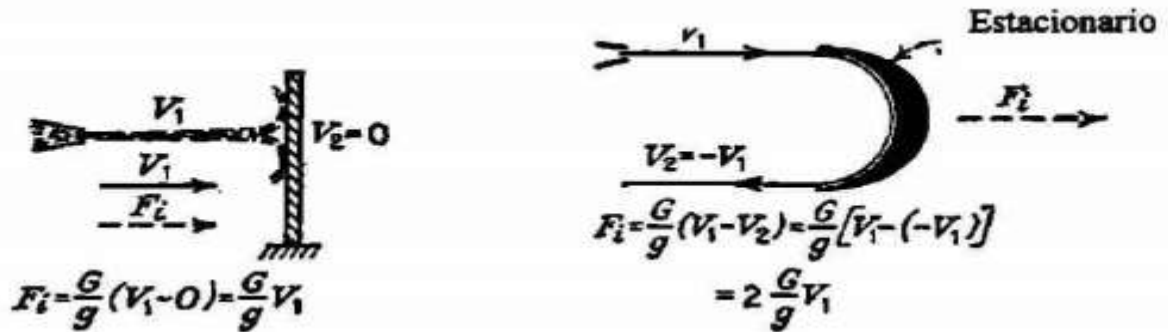
Para el diseño y optimización de las paletas de turbina se partió de la identificación de las variables de diseño, para continuar con el diseño propiamente dicho de tres tipos de paletas. Estas paletas fueron evaluadas usando el software Solidworks y a partir de la simulación se seleccionó el tipo de paleta más apropiado. Luego se procedió a seleccionar el material de fabricación. Los detalles del proceso experimental seguido se presentan a continuación.

3.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO CONCEPTUAL

Para identificar las variables de diseño se tuvo en cuenta el garantizar un buen desempeño de la máquina granalladora. Se definió entonces que las variables fundamentales a tener en cuenta para el diseño de las paletas son la geometría y el material de fabricación como acero de herramienta y fundiciones entre los más comunes. Los dos factores a evaluar en los sistemas de paletas a diseñar serán la velocidad de salida que ofrece cada sistema y la presión ejercida por estas.

3.1.1 Diseño Geométrico. Los tipos de paletas más usadas en las máquinas granalladoras son las paletas planas y las paletas curvas. Los sistemas de paletas que se diseñaron tuvieron en cuenta el principio de la fuerza de impulso. Esta fuerza es generada por la granalla al ser golpeada por la paleta. En las paletas planas la fuerza de impulso es de baja magnitud (Figura 4(a)) y en las paletas curvas la fuerza de impulso es el cambio de dirección de la velocidad tangencial del fluido (Figura 4(b)) [11].

Figura 4. (a) Fuerza de impulso debido al cambio de baja velocidad. (b) Fuerza de impulso debido al cambio de dirección de velocidad [11].



Fuente: RODRIGUEZ IBARRA, E. *Análisis termodinámico del alabe*. Nuevo león : Editorial UANL, 1999. pág. 90.

El criterio con el que se tuvo en cuenta para el diseño de las paletas curvas fue el de vórtice forzado, el cual ocurre cuando se incrementa radialmente la velocidad del flujo y la presión estática se reduce en forma radial, para establecer un fluido radial exterior. La fuerza centrífuga aumenta este flujo radial exterior y en teoría, no se obtiene un equilibrio radial. De hecho, el flujo se ajustará por sí mismo, así que el equilibrio radial se logra como resultado de los límites de la turbina, entonces, la turbina se convierte en una máquina de flujo axial [11].

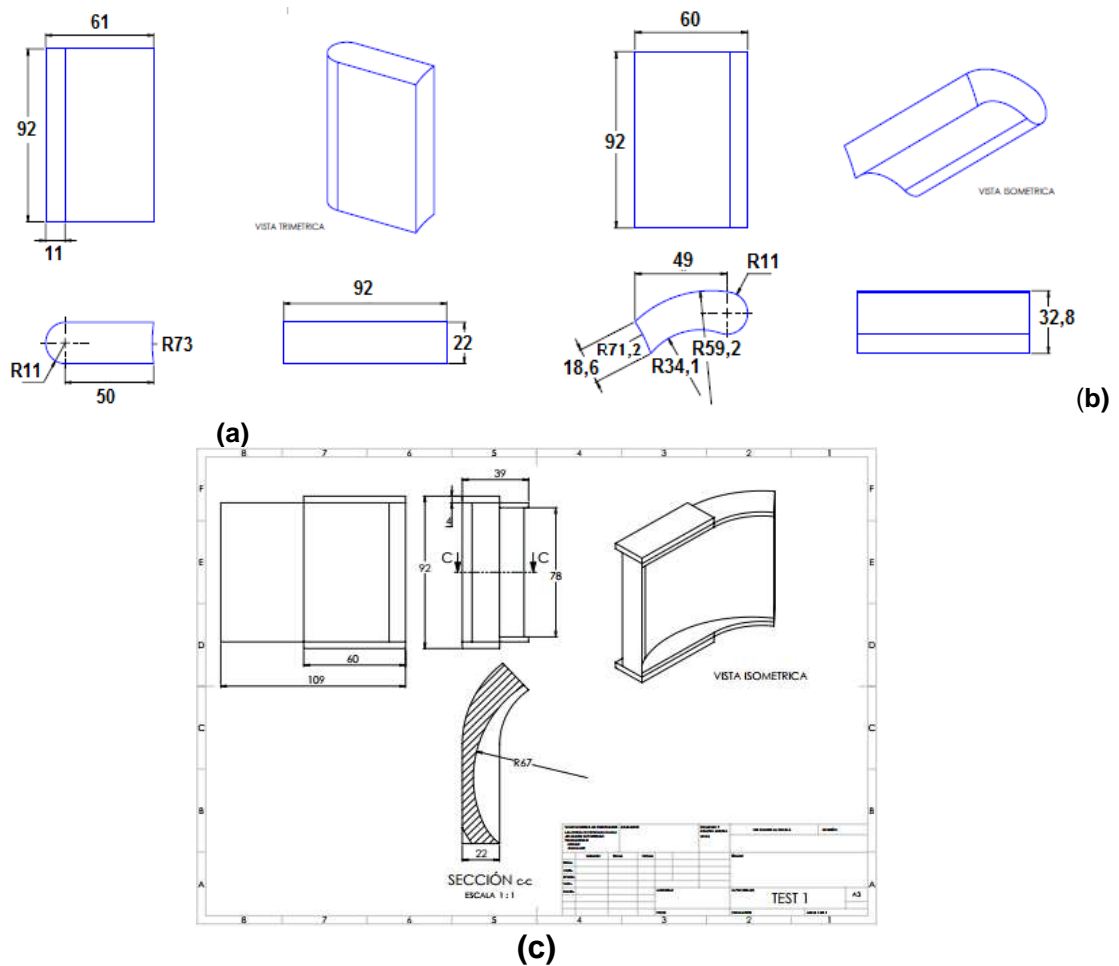
3.1.2 Selección de material de fabricación. La selección de material de fabricación de las paletas se basó en tres criterios fundamentales: velocidad del abrasivo, costo y vida de servicio. Los materiales más utilizados teniendo en cuenta los criterios anteriores son el carburo de tungsteno, los aceros de herramientas y las fundiciones. Se seleccionó el acero de herramientas A2 y la fundición gris clase 120, teniendo en cuenta su buena relación costo/beneficio. El acero A2 posee durezas entre 60-66 HRC [12], durezas alcanzadas al aplicarse un tratamiento térmico y la fundición gris clase 120 alrededor de 32 HRC [13].

3.2 DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA Y SIMULACIÓN

Se diseñaron tres tipos de sistemas de paletas, teniendo en cuenta que la mejor geometría para las paletas es la forma curva, se diseñó un sistema de paletas planas y dos sistemas de paletas curvas.

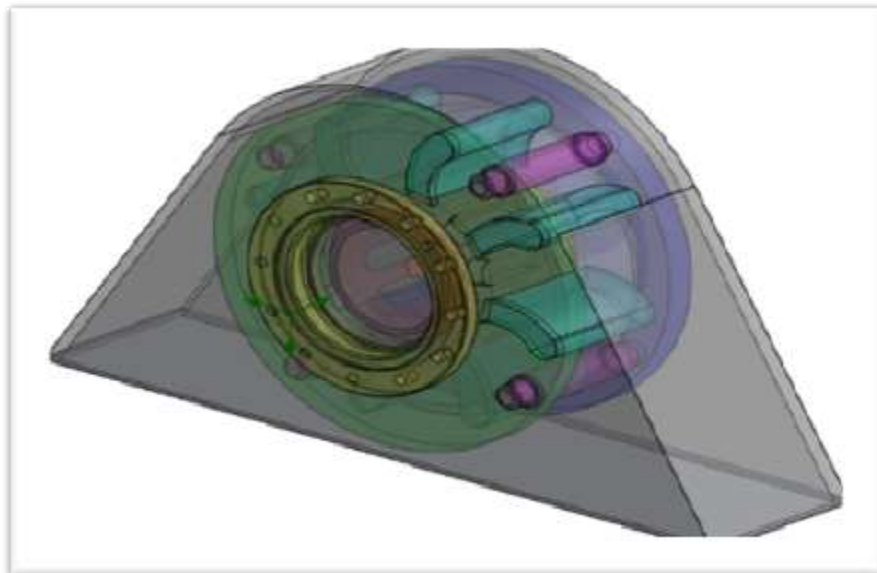
3.2.1 Planos de los sistemas de paletas. Los planos de los tres sistemas de paletas a evaluar con sus dimensiones se presentan en la Figura 5.

Figura 5. Planos de los tres sistemas de paletas seleccionadas para diseño. Unidad de medida milímetros. (a) Paleta plana. (b) Paleta en espiral y (c) Paleta con riel y en espiral.



3.2.2 Ensamblaje. Después de diseñar los sistemas de paletas se procedió a la simulación del proceso de granallado y para esto se realizó el ensamble del conjunto de la turbina que consta de las 8 paletas, la rueda de 280 mm y la carcasa (Figura 6). La velocidad de salida de la granalla y la presión total del sistema dependen de los elementos que interactúen con el fluido como son la carcasa, la rueda distribuidora la rueda centrífuga y las paletas.

Figura 6. Esquema del ensamble de la turbina para granallado de plateas intercambiables.



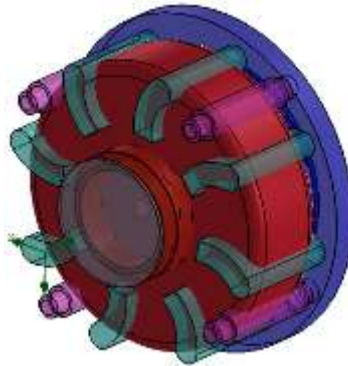
3.3 SIMULACIÓN

El sistema ya ensamblado fue simulado para conocer como la geometría de las paletas pueda afectar la velocidad de salida de la granalla y las presiones internas que ocurren en el proceso.

3.3.1 Creación del volumen de control. Se determinó un volumen de control el cual se muestra en la Figura 7, en color rojo, encima del ensamble. Este procedimiento fue necesario para delimitar la sección donde ocurre la rotación

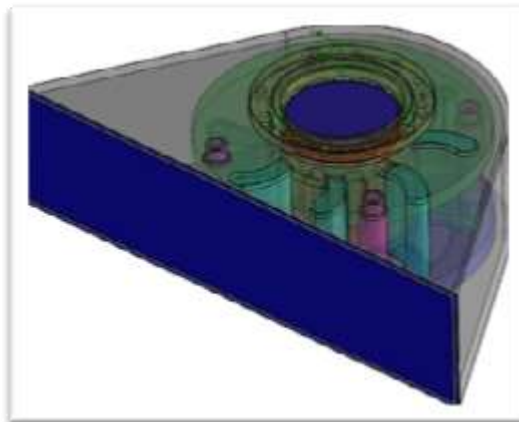
para el estudio. En este caso es la zona con el diámetro conjunto del rotor y las paletas.

Figura 7. Esquema mostrando el volumen de control delimitado (área en color rojo).



3.3.2 Construcción de tapas (Lids). Se crearon unas tapas (Lids), representadas en color azul en la Figura 8, con el fin de acotar el sistema para determinar las condiciones internas y externas del sistema e introducir las presiones entrada y presiones salida.

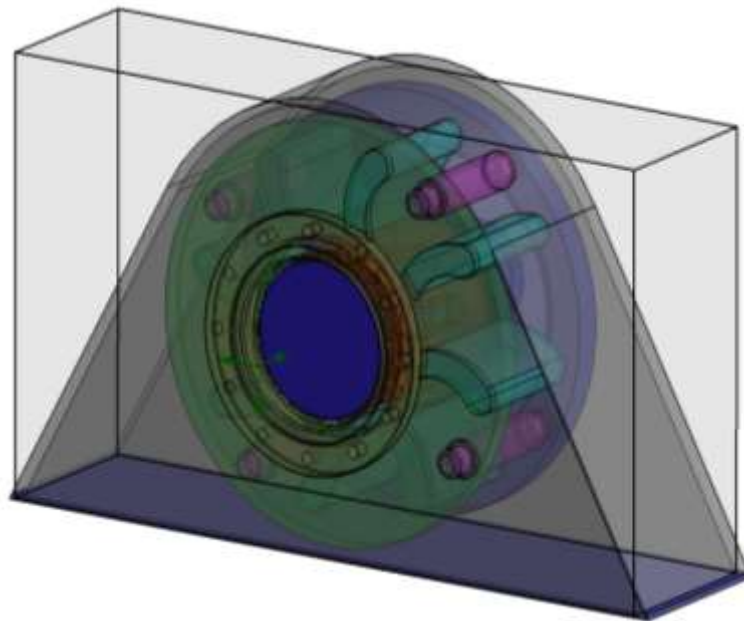
Figura 8. Esquema mostrando el ensamblaje del sistema con tapas (Lids).



3.3.3 Inicio de la simulación por flow simulation: Wizard. Se dio inicio al wizard, es decir la característica del software en la cual se configuró la simulación. Para ello se seleccionó el sistema internacional de unidades SI (m-kg-s), se definió la gravedad en el eje z como 9.81 m/s^2 , se escogió como tipo de fluido uno tipo “slurry”. Este tipo de fluido sirvió para dar las condiciones iniciales de la simulación, pero posteriormente fue remplazado por un fluido sólido de material particulado, que representara mejor la granallada usada por la máquina. El del tipo granalla que se utilizó para la simulación fue el tipo AS-280.

3.3.4 Reconocimiento de volumen de control externo. Al finalizar el wizard el software proporcionó un volumen de control externo, el cual definió el alcance de la simulación y los elementos o piezas involucrados para su realización (Figura 9).

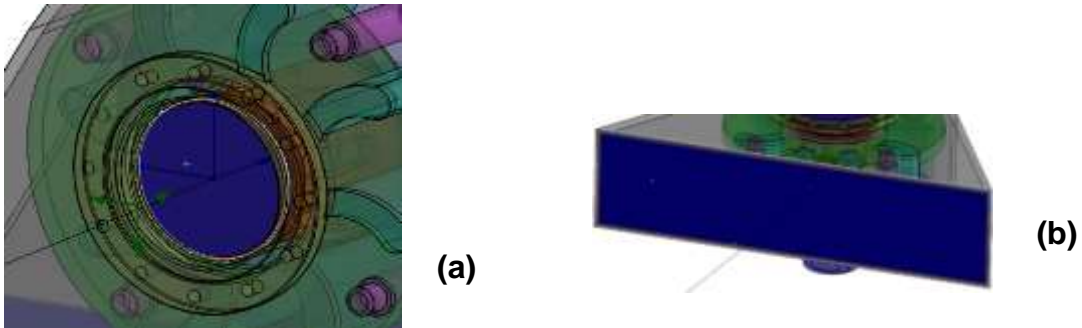
Figura 9. Esquema mostrando el volumen de control externo.



Se indicaron las condiciones de frontera, es decir a la fuerza de la presión que es ejercida en las cavidades de entrada y de salida del fluido que fueron previamente

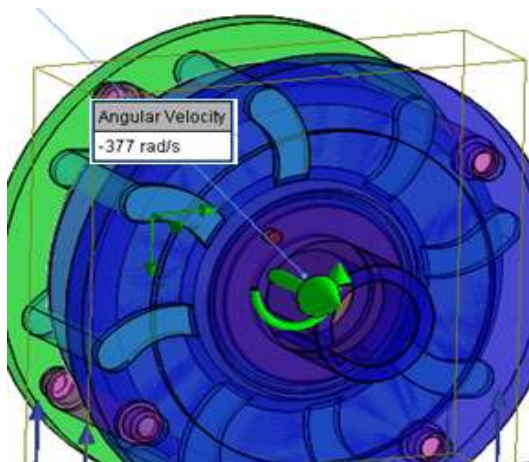
delimitadas por las tapas (Lids) (Figura 10(a) y (b)). Se usó la presión atmosférica y la temperatura ambiente (101325 Pa y 293.2 K).

Figura 10. (a) Esquema de la tapa de entrada. (b) Esquema de la tapa de salida.



Fue necesario definir el subconjunto de componentes que son parte de la región rotativa, para esto fue necesario especificar o seleccionar un componente separado que incluyó los elementos que rotarán en la simulación. Esto se hizo previamente con la creación del volumen de control (Figura 11) y se definió una velocidad angular de -377 rad/s ($3600\text{rpm}=377 \text{ rad/s}$). También fue necesario definir los objetivos (velocidad y presión) de la simulación en este caso los objetivos a simular fueron la velocidad de salida de la partícula y presión total.

Figura 11. Esquema mostrando la selección de la región rotativa.



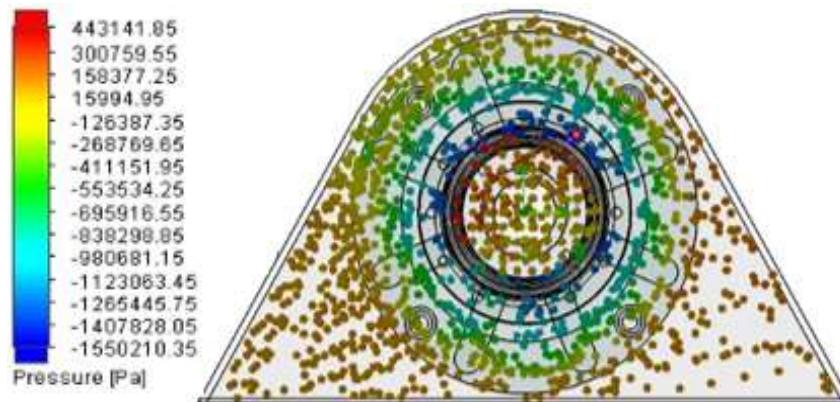
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE LOS TRES TIPOS SISTEMAS DE PALETAS

Luego de la simulación se analizó el perfil de velocidad para conocer la velocidad de salida de la granalla y el perfil de presión para conocer las regiones estructurales más débiles del sistema.

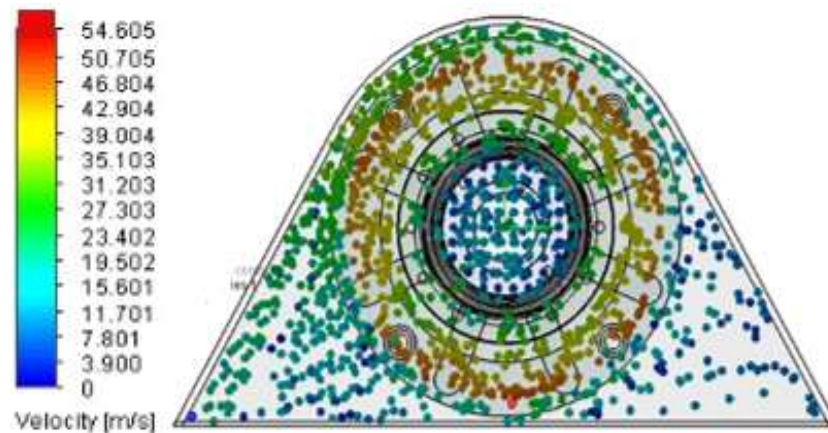
4.1.1 Sistema de paletas planas. El máximo valor de presión registrado fue de 443 KPa en las zonas de color rojo como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Distribución de flujo en el sistema de paletas planas (presión).



La máxima velocidad del flujo registrada fue de 54.6 m/s (Figura 13). Esta velocidad es alcanzada por las partículas de color rojo siendo estas las de mayor velocidad y van disminuyendo hasta llegar a las partículas de color azul.

Figura 13. Distribución de flujo en el sistema de paletas planas (velocidad de salida de la granalla).



En este sistema de paletas planas se requiere un motor con mayor potencia que el seleccionado (30 HP) para garantizar una velocidad de flujo máxima de 54.6 m/s. También se resalta como la distribución de flujo se limita a un costado del sistema, de forma tangencial y en línea recta, entonces la mayor parte del material particulado va cayendo en sentido de la gravedad (Figura 13). Las presiones a las cuales estas paletas están siendo sometidas se distribuyen de manera uniforme aumentando hacia los extremos de dichas paletas con un máximo de presión de 443 KPa.

4.1.2 **Sistema de paletas en espiral.** En este caso el máximo valor de presión registrado fue de 829 KPa (Figura 14). La máxima velocidad del flujo registrada fue de 60 m/s (Figura 15).

Figura 14. Distribución de flujo en el sistema de paletas en espiral (presión).

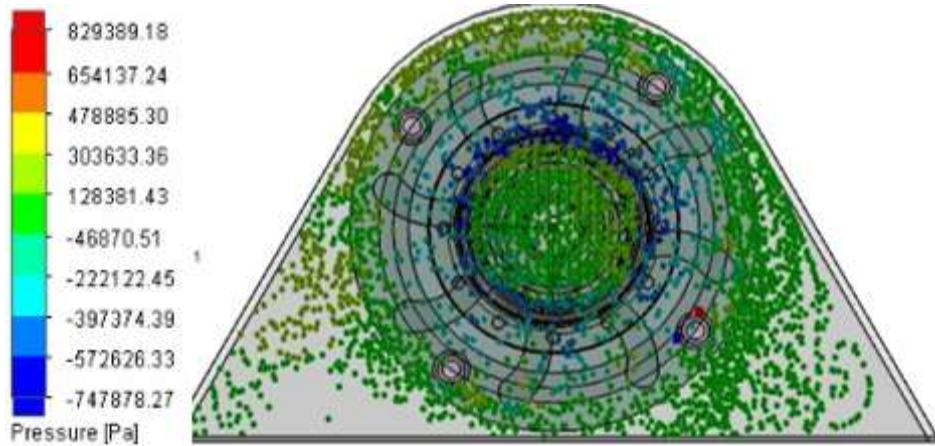
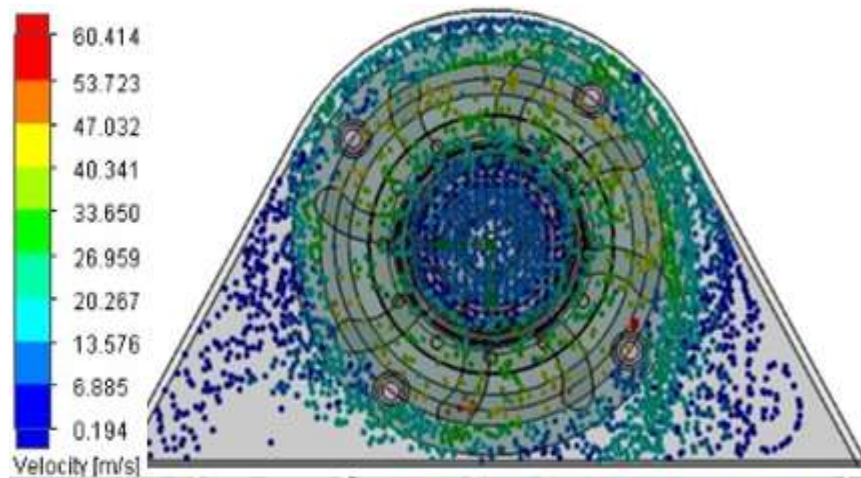


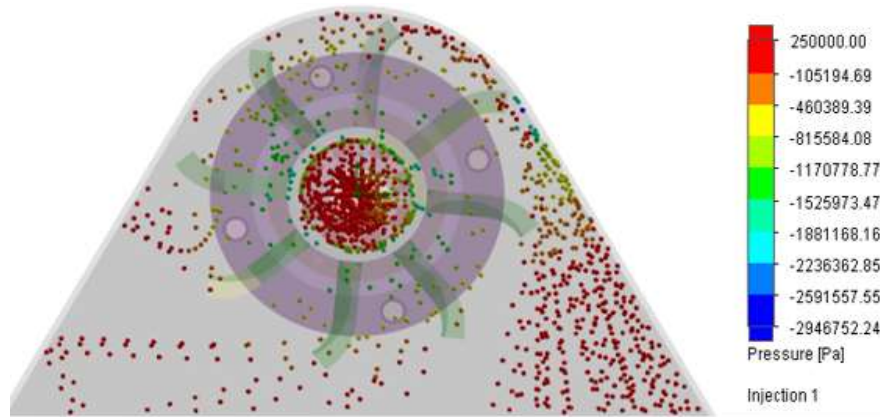
Figura 15. Distribución de flujo en el sistema de paletas en espiral (velocidad de salida de la granalla).



El sistema de paletas intercambiables en espiral es más eficiente en comparación con el sistema de paletas planas, ya que se logra la expulsión de la mayoría del material particulado, entregando un flujo continuo, no vertical sino ligeramente inclinado. En este sistema se encontró una ganancia de velocidad de hasta 60 m/s en algunas partículas del sistema, pero no en todas ellas, dando un promedio de 33 m/s y un máximo de 53 m/s

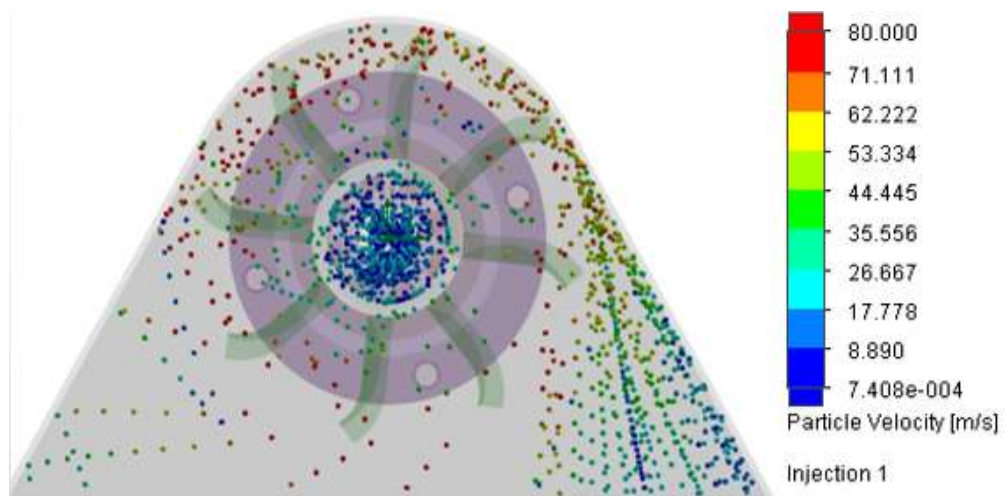
4.1.3 Sistema de paletas intercambiables con riel y perfil en espiral. El valor máximo de presión fue de 250 KPa en la zona de color rojo como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Distribución de flujo en el sistema de paletas con riel y perfil en espiral (presión).



La máxima velocidad de flujo fue de 80 m/s (Figura 17). Esta velocidad es alcanzada por las partículas de color rojo siendo estas las de mayor velocidad y hasta llegar a las partículas de color azul.

Figura 17. Perfil Distribución de flujo en el sistema de paletas con riel y perfil en espiral (velocidad de salida de la granalla).



El sistema de paletas con riel en espiral presentó unas velocidades promedio de flujo de 40 m/s y máxima de 71 m/s, pudiendo llegar hasta 80 m/s. Estas velocidades son óptimas para un proceso de granallado efectivo [1]. Así mismo, es importante recordar que las partículas se volverán más pequeñas después de varios ciclos del proceso y que estas son usadas repetitivamente a través de la máquina. La máquina granalladora comienza con una granalla tipo AS-280 que después de varios ciclos se pueden convertir en tipo AS-230, AS-170, AS-110 y menos disminuyendo su diámetro y peso, aumentando así las velocidades de salida que arrojó la simulación [2].

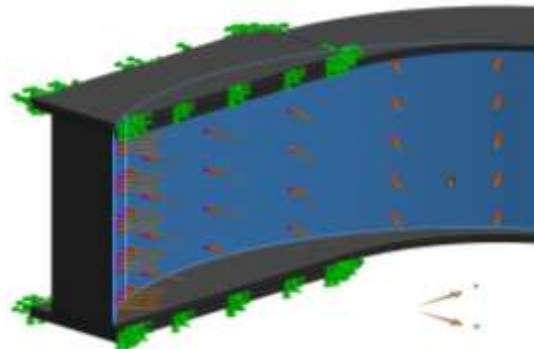
Teniendo en cuenta los resultados es evidente que el diseño de sistema de paletas más apropiado para la máquina granalladora es el sistema de paletas con riel y en espiral.

4.2 ESTUDIO ESTÁTICO PARA UN ACERO DE HERRAMIENTA A2 Y UNA FUNDICIÓN GRIS CLASE 120

Utilizando el sistema seleccionado, sistema de paletas con riel y en espiral se realizó un último estudio por elementos finitos por medio de un estudio estático para evaluar los dos tipos de material de fabricación de las paletas, es decir un acero de herramientas A2 y una fundición gris clase 120.

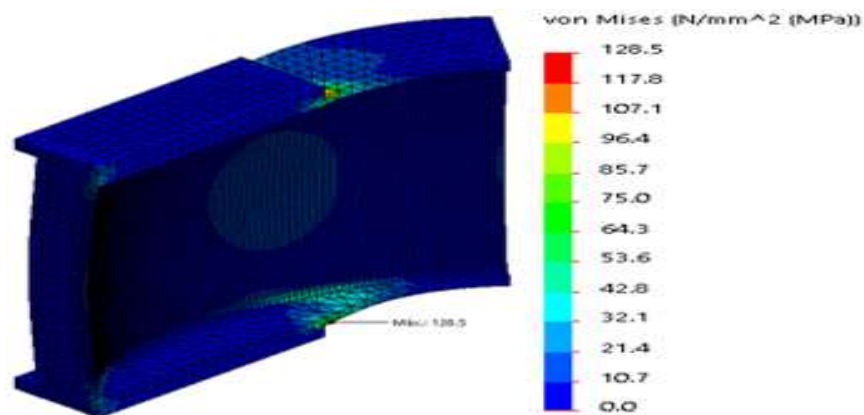
El estudio estático para ambos materiales se realizó con las mismas condiciones iniciales, las mismas sujeciones de geometría fija y la misma carga de 533000 N/m² (Figura 18).

Figura 18. Esquema mostrando las cargas aplicadas al sistema de paletas con riel y en espiral, escala 1:2.



4.2.1 Tensiones para el acero de herramientas A2. Las tensiones resultantes en las paletas si son fabricadas con un acero A2, son del tipo Von Mises, con un máximo de 128.523 N/mm^2 (MPa). Estos valores máximos (color rojo) se encuentran ubicados en los soportes y tienden hacia el riel de la paleta hasta alcanzar un mínimo de $1.98987\text{e-}007 \text{ N/mm}^2$ (MPa) (Figura 19).

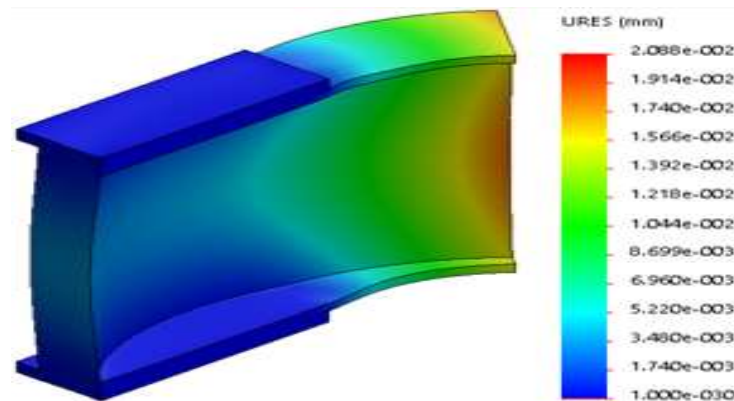
Figura 19. Tensiones registradas en las paletas cuando son fabricadas con un acero de herramientas A2, escala 1:2.



4.2.2 Desplazamientos observados para el acero de herramientas A2. El mayor desplazamiento fue de 0.02 mm , referenciado en la escala con un color

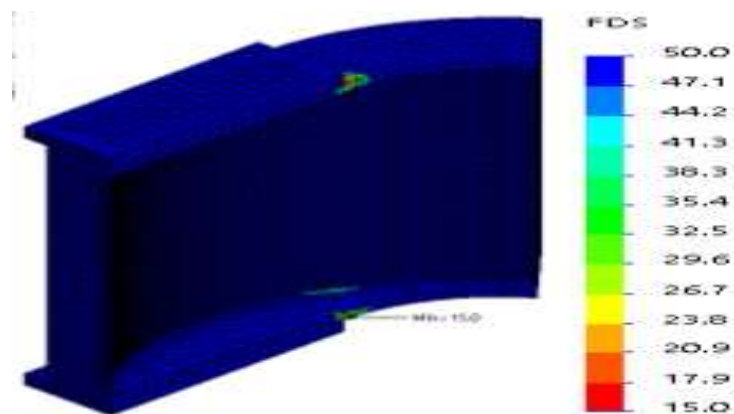
naranja, y la zona de la paleta más afectada por estas cargas es la punta de la paleta en la zona naranja, donde se deformará con más facilidad (Figura 20).

Figura 20. Desplazamientos resultantes cuando las paletas son fabricadas con un acero de herramientas A2, escala 1:2.



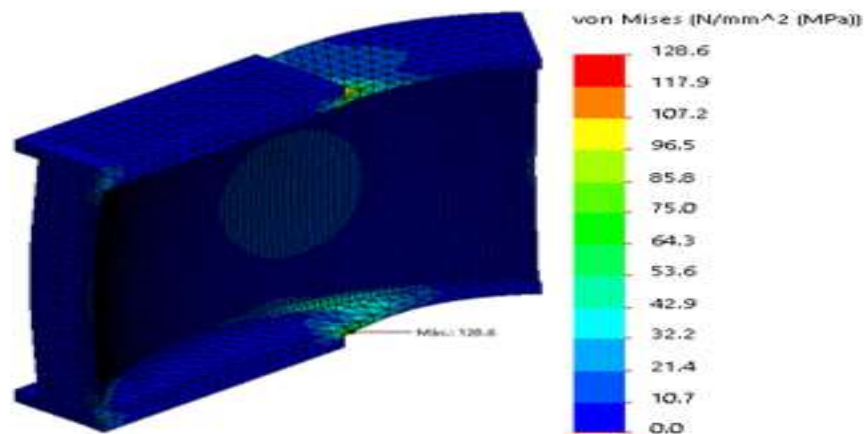
4.2.3 Factor de seguridad cuando las paletas son fabricadas con un acero de herramientas A2. El factor de seguridad es la relación entre la resistencia real y la resistencia requerida por la pieza. El factor de seguridad debe ser mayor a 1 para que la pieza no falle, en este caso el menor factor de seguridad fue de 15 en los soportes de la paleta en la zona de color rojo como se muestra en la Figura 21.

Figura 21. Factor de seguridad cuando las paletas son fabricadas con un acero de herramientas A2, escala 1:2.



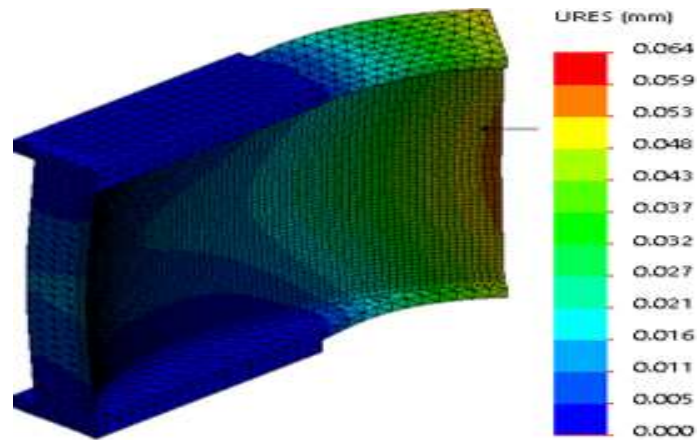
4.2.4 Tensiones para la fundición gris clase 120. Las tensiones resultantes si las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120 son de tipo Von Mises y presentan un máximo de 128.64 N/mm² (MPa). Estos valores máximos (color rojo) se encuentran ubicados en los soportes y tienden hacia el riel de la paleta, las paletas registraron un mínimo de 2×10^{-7} N/mm² (MPa) en toda su estructura (Figura 22).

Figura 22. Tensiones registradas cuando las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120, escala 1:2.



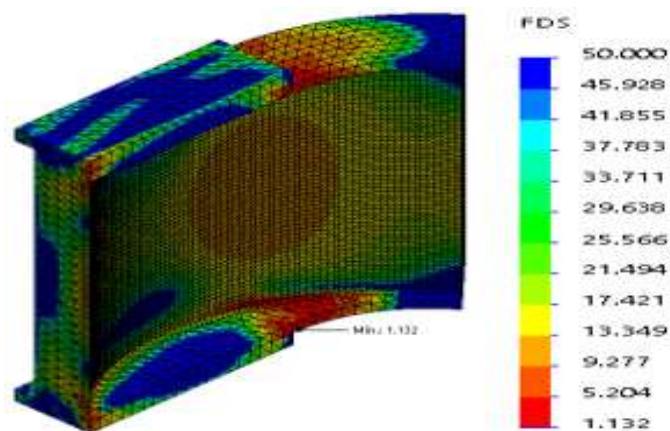
4.2.5 Desplazamientos con la fundición gris clase 120. El mayor desplazamiento fue de 0.06 mm, evidenciado en la escala con un color rojo, y la zona de la paleta que se ve más afectada por estas cargas es la punta de la paleta en la zona naranja, donde se deformará con más facilidad como se evidencian en la Figura 23.

Figura 23. Desplazamientos resultantes cuando las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120, escala 1:2.



4.2.6 Factor de seguridad cuando las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120. El mínimo valor del factor de seguridad registrado fue 1.132, con una mayor severidad en las zonas de color rojo como el soporte, en el riel y en la junta entre el perfil interno de la paleta y el riel (Figura 24).

Figura 24. Factor de seguridad cuando las paletas son fabricadas con una fundición gris clase 120, escala 1:2.



El estudio estático realizado de las paletas en espiral entregó los resultados en forma de perfiles de deformación, perfiles de esfuerzos y perfil de factor de seguridad. Al comparar los dos tipos de materiales de fabricación para las paletas, el acero de herramienta A2 y la fundición gris clase 120, se observa que ambos materiales soportan las cargas máximas aplicadas en la operación del sistema. Sin embargo, las paletas fabricadas con el acero de herramientas A2 presentan un factor de seguridad mínimo de 15, en comparación con la fundición gris clase 120 que es de 1.13, esto determina una mayor durabilidad para las paletas fabricadas con el acero. El factor de seguridad de 15 en el acero muestra un claro sobredimensionamiento, pero este sobredimensionamiento se aprovecha al ser una pieza que será desgastada en su vida útil y así se asegura un mayor tiempo de operación que si las paletas son fabricadas con la fundición gris clase 120. Si las paletas son fabricadas con la fundición gris clase 120, la vida útil será menor y por ende se podrán presentar más recambios. Sin embargo, el factor de seguridad de la fundición gris es mayor que 1, sugiriendo que las paletas podrían fabricarse con la fundición gris clase 120 si la máquina granalladora se usa para procesos cortos de granallado (Figura 24).

5. CONCLUSIONES

- Las series de simulaciones realizadas a través de solidworks determinaron que las variables de diseño que afectan la velocidad de salida de la granalla para generar un proceso más eficiente fueron la geometría de las paletas (longitud, ancho, espesor, etc.) y el tipo de material de fabricación.
- Por el estudio de elementos finitos realizado se concluyó que la mejor geometría para diseñar paletas para máquinas centrifugas como las granalladoras son las geometrías de forma cóncava o curva.
- El sistema más eficiente según el estudio de fluido particulado realizado fue el sistema de paletas con riel y en espiral fabricado con un acero de herramientas A2. Este sistema ofrecer mejor aprovechamiento de las granallas y genera una excelente velocidad de salida garantizando un granallado uniforme con bajas tensiones.

6. RECOMENDACIONES

- Es de suma importancia realizar estos estudios en computadores potentes que tengan las capacidades para resolver las ecuaciones necesarias en un tiempo efectivo y corto ya que estos estudios al ser iterativos dependen de varias simulaciones y al hacerse en equipos inapropiados o comunes pueden tomar horas y hasta días dependiendo del alcance del estudio.
- Se recomienda acotar el estudio para hacerlo más eficiente y corto teniendo en cuenta las variables mencionadas anteriormente, sin dejar de lado ninguna ya que de estas dependerá el resultado del estudio.
- sería factible alternar las longitudes de las paletas en una turbina teniendo algunas más largas que otras para tener una noción diferente de estos sistemas ya que la longitud de las paletas es tan importante para su diseño.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

[1]. **HERNANDEZ, Héctor**, *et al.* Mejoramiento para el proceso de granallado para resortes de ballesta utilizando medición de esfuerzos residuales por difracción de rayos x. [Base de datos en línea]. Diciembre de 2004. Revista ingeniería e investigación, 2004, Vol. 56, 33-34. (recuperado en 27 de noviembre 2017). Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingeiniv/article/viewFile/14608/15446>

[2]. **Thefabricator.com, fabricators & manufacturers association, Intl.** Thefabricator.com. [En línea] 12 de Diciembre de 2013. (Recuperado en 10 de noviembre 2017) Disponible en <https://www.thefabricator.com/spanish/los-aspectos-basicos-del-granallado--por-turbina>.

[3]. **VÁZQUEZ VAAMONDE, Alfonso y DAMBORENEA GONZÁLEZ, Juan.** *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos*. Madrid : Editorial CSIC, 2000. págs. 9,10.

[4]. **WATANABE, Thales.** *El proceso de granallado*. Indústria de Fundação Tupy Ltda. pág. 11. [En línea]. (Recuperado en 25 de septiembre 2017). Disponible en http://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/granalhas/grana_esp.pdf.

[5]. **CYM MATERIALES S.A, soluciones industriales.** Turbinas de granallado ruedas monoblock vs. paletas intercambiables. [En línea] [Citado el: 06 de noviembre de 2017.] <https://cym.com.ar/intranet/Turbinas-granallado-granalla-wheel-blasting-surfacepreparation-cym.pdf>

[6]. **TORRES JARAMILLO, Santiago Ramiro.** *Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para unidad de mantenimiento y transporte.* Sangolquí : Editorial ESPE, 2013. pág. 20.

[7]. **GORDON TAIBO , Marta.** *Diseño de una cabina de granallado.* Catalunya : Editorial Universitat politécnica de catalunya, 2005. pág. 10.

[8]. **KAITAI.** Shot blasters. Maquina granalladora con rail suspendido continuo. [En línea]. (Recuperado en 15 de noviembre 2017). Disponible en <http://shot-blasters.com/1-6-continuous-shot-blast-machine/179720>.

[9]. **TORRES JARAMILLO, Santiago Ramiro.** *Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para una unidad de mantenimiento y transporte.* Sangolquí : Editorial ESPE, 2013. págs. 23-24.

[10]. **Pomenton.** Pomenton, Metal powders and granules. [En línea] [Citado el: 23 de Enero de 2018.] <http://www.pometon.net/PDF/ShotpeeningTab.pdf>.

[11]. **RODRIGUEZ IBARRA, Eulalio.** *Analisis termodinamico del alabe.* Nuevo leon : Editorial UANL, 1999. pág. 90.

[12]. **UNIVERSIDAD DE LA PLATA, Facultad de ingenieria.** *Fases y estructuras.* Buenos aires : Editorial UNLP 13 de Julio de 2012.

[13]. **CASTRO, Guillermo.** *Fundiciones.* Buenos aires : Editorial F.I.U.B.A., 2009. pág. 10.

BIBLIOGRAFÍA

CASTRO, Guillermo. *Fundiciones.* Buenos aires : Departamento de ingeniería mecánica F.I.U.B.A., 2009. pág. 10.

CYM MATERIALES S.A, soluciones industriales. *Turbinas de granallado ruedas monoblock vs. paletas intercambiables.* [En línea] [Citado el: 06 de noviembre de 2017.] <https://cym.com.ar/intranet/Turbinas-granallado-granalla-wheel-blasting-surfacepreparation-cym.pdf>

GORDON TAIBO , Marta. *Diseño de una cabina de granallado.* Catalunya : Universitat politècnica de catalunya press, 2005. pág. 10.

HERNANDEZ, Héctor, et al. Mejoramiento para el proceso de granallado para resortes de ballesta utilizando medición de esfuerzos residuales por difracción de rayos x. [Base de datos en línea]. Diciembre de 2004. Revista ingeniería e investigación, 2004, Vol. 56, 33-34. (recuperado en 27 de noviembre 2017). Disponible en <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ingev/article/viewFile/14608/15446>

KAITAI. Shot blasters. Maquina granalladora con rail suspendido continuo. [En línea]. (Recuperado en 15 de noviembre 2017). Disponible en <http://shot-blasters.com/1-6-continuous-shot-blast-machine/179720>.

Pomenton. Pomenton, Metal powders and granules. [En línea] [Citado el: 23 de Enero de 2018.] <http://www.pometon.net/PDF/ShotpeeningTab.pdf>.

RODRIGUEZ IBARRA, Eulalio. *Análisis termodinámico del alabe.* Nuevo león : UANL, 1999. pág. 90.

Thefabricator.com, fabricators & manufacturers association, Intl. Thefabricator.com. [En línea] 12 de Diciembre de 2013. (Recuperado en 10 de noviembre 2017) Disponible en <https://www.thefabricator.com/spanish/los-aspectos-basicos-del-granallado--por-turbina>.

TORRES JARAMILLO, Santiago Ramiro. *Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para una unidad de mantenimiento y transporte.* Sangolquí : ESPE, 2013. págs. 23-24.

TORRES JARAMILLO, Santiago Ramiro. *Diseño y construcción de un prototipo de una estación de limpieza mecánica mediante el proceso de sandblasting utilizando granalla mineral en ciclo continuo para unidad de mantenimiento y transporte.* Sangolquí : ESPE, 2013. pág. 20.

UNIVERSIDAD DE LA PLATA, Facultad de ingeniería. *Fases y estructuras.* Buenos aires : UNLP, 13 de Julio de 2012.

VÁZQUEZ VAAMONDE, Alfonso y DAMBORENEA GONZÁLEZ, Juan. *Ciencia e ingeniería de la superficie de los materiales metálicos.* Madrid : CSIC, 2000. págs. 9,10.

WATANABE, Thales. *El proceso de granallado.* Indústria de Fundição Tupy Ltda. pág. 11. [En línea]. (Recuperado en 25 de septiembre 2017). Disponible en http://www.tupy.com.br/downloads/pdfs/granalhas/grana_esp.pdf.