DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRIBÓMETRO TIPO CHORRO DE AGUA

ELIANA SÁNCHEZ MARTÍNEZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGAMA INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRIBÓMETRO TIPO CHORRO DE AGUA

ELIANA SÁNCHEZ MARTÍNEZ

Proyecto de grado presentado para optar al título de Ingeniera Mecánica

DIRECTOR:
JOHN JAIRO CORONADO M.
INGENIERO MECÁNICO, PH.D

CO-DIRECTOR:
SARA AIDA RODRIGUEZ P.
INGENIERA MECÁNICA, PH.D



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGAMA INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014

Santiago de Cali, 2014.

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité de trabajo de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, para optar por el título de Ingeniera Mecánica.

_____

JOHN JAIRO CORONADO M.
Director del proyecto

_____

SARA AIDA RODRIGUEZ P
Co-directora del proyecto

_____

ALEXANDER LADINO
Jurado

_____

ALEJANDRO TORO
Jurado

Dedicado

A mis padres, Carmen Elisa Martínez y Marco Tulio Sánchez por su apoyo y constante esfuerzo para que yo pudiera culminar mis estudios.

A mi hermana Lisette Sánchez Martínez por su acompañamiento y ejemplo.

A mi perro Kafú porque en estos últimos días llenos de estrés ha podido robarme varias sonrisas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Valle, por haberme permitido hacer parte de tan importante institución y haberme formado como ingeniera mecánica.

Al grupo de Investigación en Fatiga y Superficies por permitirme hacer parte de su grupo de trabajo y aportarme el tema de investigación para mi proyecto de grado.

A don Guillermo Perea quien merece un ESPECIAL agradecimiento por enriquecerme con sus conocimientos y ser de gran ayuda en mi proyecto de grado.

A Vladimir, don Ernesto, Edison, Orlando y Brayan por su colaboración en la construcción del tribómetro.

A mis compañeros de carrera, en especial a Phil Anderson Pontoja, Andrés Torres, Danny Polanía, Brayan Iglesias, Jhon Jairo Obregón y Juan David Pérez quienes me apoyaron y aportaron a este trabajo.

A mi novio Juan David Cano por sus correcciones en la redacción del documento.

A los miembros del Jurado de esta tesis por sus valorables sugerencias a la versión original del manuscrito, que contribuyeron al mejoramiento y ordenamiento del presente trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN 3

1. INTRODUCCIÓN 4

2. OBJETIVOS 5

2.1 OBJETIVO GENERAL 5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5

3. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES 6

3.1 MARCO TEÓRICO 6
3.1.1 Desgaste erosivo 6
3.1.2 Cálculo de la densidad del *slurry* 10
3.1.3 Cálculo de la densidad de una mezcla de *slurry* con aire 10
3.1.4 Cilindros de pared delgada sometidos a presión. 11
3.1.5 Cálculo de la velocidad tangencial de un fluido incompresible en el espacio entre dos cilindros 12
3.2 ANTECEDENTES 15
3.2.1 Tribómetros de *slurry* erosión construidos en la Universidad del Valle. 15
3.2.2 Tribómetros de *slurry* erosión tipo chorro de agua 19

4. DISEÑO Y MANUFACTURA DEL TRIBÓMETRO 23

4.1 CONSULTA DE ANTECEDENTES 24
4.2 REQUERIMIENTOS DEL TRIBOMETRO 24
4.3 INGENIERÍA BÁSICA 25
4.4 INGENIERÍA DE DETALLE 37
4.4.1 Cálculo del espesor mínimo del tanque. 37
4.4.2 Cálculo de la velocidad promedio de salida del chorro 38

5. MATERIALES Y MÉTODOS 42

5.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS PRUEBAS 42
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE PRUEBA 43
5.2.1 Metalografía 43

5.2.2 Medición de dureza 46
5.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS ABRASIVAS 47
5.3.1 Granulometría 47
5.3.2 Morfología 49
5.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS 50
5.4.1 Probetas 50
5.4.2 Ensayos 50

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 54

6.1 GRÁFICA DE LA TASA DE DESGASTE CON RESPECTO AL ÁNGULO DEL TRIBÓMETRO DE CHORRO DE AGUA 54
6.2 COMPARACIÓN DEL TRIBÓMETRO CON OTROS TRABAJOS 55
6.3 GRÁFICA DE LA TASA DE DESGASTE CON RESPECTO AL ÁNGULO DEL TRIBÓMETRO DE CILINDRO ROTATORIO 57
6.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS TRIBÓMETROS USADOS EN LA INVESTIGACIÓN 58
6.5 IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA DEL MATERIAL ABRASIVO 61
6.6 IDENTIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE 62
6.6.1 Mecanismos de desgaste en las probetas del tribómetro de cilindro rotatorio. 62
6.6.2 Mecanismos de desgaste en las probetas del tribómetro tipo chorro de agua. 65

7. CONCLUSIONES 69

8. RECOMENDACIONES 71

REFERENCIAS 72

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Micro mecanismos de desgaste posibles de erosión; a) micro corte que se presenta con más frecuencia a ángulos bajos de impacto, b) micro fatiga superficial que se presenta con más frecuencia a velocidad baja y ángulo de impacto grande, c) múltiple deformación plástica que se presenta con mayor frecuencia velocidad media y ángulo de impacto, d) grande micro fractura frágil, e) fusión de la superficie a grandes velocidades de impacto, f) erosión macroscópica con efectos secundarios. [5] 7

Ilustración 2. Contacto entre una partícula y una superficie plana bajo carga normal. [9] 8

Ilustración 3. Desgaste erosivo en función del ángulo de impacto para materiales dúctiles y frágiles**.** [9] 9

Ilustración 4. Microscopía electrónica de barrido de partículas con diferentes morfologías. [4] 10

Ilustración 5. Criterio para diferenciar cilindros de pared gruesa y delgada. [12] 11

Ilustración 6. Cilindro de pared delgada sometido a presión. (a) esfuerzos que actúan sobre el cilindro, (b) esfuerzos que actúan sobre un elemento. [13] 12

Ilustración 7. Configuración de un flujo laminar incompresible en el espacio entre dos cilindros. [15] 13

Ilustración 8. Tribómetro de corrosión-erosión construido por Caicedo. [16]..... 16

Ilustración 9. Esquema del tribómetro de corrosión-erosión de Caicedo. [16] 16

Ilustración 10. Tribómetro de corrosión-erosión construido por Vargas. [17] 17

Ilustración 11. Tribómetro de erosión construido por Chávez. [2] 17

Ilustración 12. Diseño de la tapa. [2] 18

Ilustración 13. Representación esquemática de los diferentes tipos de tribómetros de chorro de agua utilizados: (a) Tribómetro RC generalmente usado, (b) Tribómetro NRC propuesto por Zu et al [20], y (c) Tribómetro NRC utilizado por Lin et al [22] y Santa et al [23]. 20

Ilustración 14. Esquema del tribómetro de *slurry* erosión (NRC) utilizado por Santa et al. [23]22

Ilustración 15. Diagrama de actividades para el diseño del tribómetro. 23

Ilustración 16. Esquema del tribómetro construido. 25

Ilustración 17. Cabina. (a) estructura metálica de la cabina (b) parrilla y guantes de la cabina (c) vista lateral de la cabina. 26

Ilustración 18. Soporte metálico. (a) soporte metálico completo (b) placa metálica. 28

Ilustración 19. Soporte para la pistola de chorro de agua. 28

Ilustración 20. Componentes del sistema del porta-muestras y posicionador..... 29

Ilustración 21. Sistema porta-muestras y posicionador. [2] 29

Ilustración 22. Pistola de *Sand-blasting* del laboratorio de tribología. 30

Ilustración 23. Boquilla de la pistola de *Sand-blasting*..... 31

Ilustración 24. Pieza 1- entrada del aire. 31

Ilustración 25. Pieza 2- entrada del slurry..... 32

Ilustración 26. Pieza 3- unión de los fluidos. (a) sólido de la pieza 3 (b) planos de la pieza 3... 33

Ilustración 27. Pistola del tribómetro. 33

Ilustración 28. Tanque del Slurry. (a) vista frontal del tanque (b)agujero de descarga (c) conexión del aire a presión con los serpentines. 34

Ilustración 29. Esquema de la ubicación de los serpentines. 34

Ilustración 30. Regulador de presión. 35

Ilustración 31. Tribómetro de chorro de agua construido. (a) pistola, porta-probetas y porta-muestras (b) interior de la cabina (c) tribómetro de chorro de agua, vista externa. 36

Ilustración 32. Pieza propuesta para evitar el desgaste en el porta-muestras. (a) vista de frontal (b) vista lateral derecha (c) sólido de la pieza. 36

Ilustración 33. Especificaciones del tanque del tribómetro. 37

Ilustración 34. Montaje realizado para la medición de la velocidad de salida del aire. 39

Ilustración 35. Velómetro. 39

Ilustración 36. Esquema del tribómetro semi (RC) utilizado por Zu et al. [20]..... 42

Ilustración 37. Cortes realizados para la metalografía. 44

Ilustración 38. Microestructura del material de prueba, corte transversal con aumento de 100x. 44

Ilustración 39. Microestructura del material de prueba, corte longitudinal con aumento de 250x. 45

Ilustración 40. Microestructura de un Aluminio de la serie 5xxx, con aumento de 200x. (a) lingote, (b) láminas. [34]..... 46

Ilustración 41. Microestructura de un Aluminio de la serie 6xxx. [35] 46

Ilustración 42. Tamizadora del laboratorio de Mecánica de Fluidos. 47

Ilustración 43. Granulometría de la arena antes de los ensayos. 48

Ilustración 44. Arena cuarzo utilizada en las pruebas, aumento de 20x. 49

Ilustración 45. Gráfica de pérdida de masa en función del tiempo de una réplica realizada en el tribómetro de cilindro rotatorio. 51

Ilustración 46. Gráfica de tasa de desgaste en función del ángulo de impacto para el tribómetro tipo chorro de agua..... 54

Ilustración 47. Efecto del tamaño de partícula en el desgaste erosivo. [38] 55

Ilustración 48. Gráfica de tasa de erosión en función del ángulo de impacto para Aluminio (o), cobre (●), acero dulce (□) y alúmina (■), erosionados por *slurry* de arena sílice entre 600-1000 µm con una concentración del 17% a una velocidad de 5,3 m/s. [20]..... 56

Ilustración 49. Gráfica de tasa de desgaste en función del ángulo de impacto para el tribómetro de cilindro rotatorio..... 57

Ilustración 50. Pérdida de masa a 30° y 90°, reportada en los ensayos realizados por Chávez. [2]..... 58

Ilustración 51. Dispersión de los resultados en el tribómetro tipo chorro de agua para 15° (◆), 30° (■), 45° (▲), 60° (×) y 90° (✳). 60

Ilustración 52. Dispersión de los resultados en el tribómetro de cilindro rotatorio para 15° (■), 30° (▲), 45° (◆) y 90° (×)..... 60

Ilustración 53. Granulometría de la arena después de los ensayos. 62

Ilustración 54. SEM realizado a una probeta sometida a desgaste erosivo de 45 º. (a) aumento de 100x (b) aumento de 500x. 63

Ilustración 55. SEM realizado a una probeta sometida a desgaste erosivo de 90 º (a) aumento de 100x (b) aumento de 500x. 64

Ilustración 56. Superficie de desgaste obtenida en el tribómetro tipo chorro de agua a 15°. 66

Ilustración 57. Superficie de desgaste obtenida en el tribómetro tipo chorro de agua a 45°. 66

Ilustración 58. Superficie de desgaste obtenida en el tribómetro tipo chorro de agua a 90°. 67

Ilustración 59. Superficies de desgaste obtenidas en ambos tribómetros a 15°, 45° y 90° 68

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de operación de los tribómetros de chorro de agua encontrados en la literatura. [18] 21

Tabla 2. Mediciones de velocidad del flujo de aire a diferentes presiones y cálculo del caudal de aire. 40

Tabla 3. Mediciones y cálculos del caudal obtenidos en los aforos a diferentes presiones y concentraciones. 40

Tabla 4. Velocidades de salida a diferentes presiones y concentraciones. 41

Tabla 5. Parámetros de ensayo utilizados en el artículo de Zu et al. [20] 43

Tabla 6. Tamizado de la arena antes de los ensayos. 48

Tabla 7. Factor de forma de la arena de prueba. 49

Tabla 8. Parámetros de ensayo en el tribómetro de cilindro rotatorio. 52

Tabla 9. Parámetros de ensayo en el tribómetro tipo chorro de agua. 53

Tabla 10. Desviación estándar, intervalos de confianza y errores de cada ángulo evaluado en el tribómetro tipo chorro de agua. 59

Tabla 11. Desviación estándar, intervalos de confianza y errores de cada ángulo evaluado en el tribómetro de cilindro rotatorio. 59

Tabla 12. Tamizado de la arena después de los ensayos. 61

Tabla 13. EDS de la partícula. 64

RESUMEN

En el presente proyecto se diseñó, construyó y evaluó un tribómetro de erosión tipo chorro de agua, capacitado para alcanzar velocidades por encima de los 100 m/s, variar la concentración de las partículas de 0% a 30% y el ángulo de impacto de 0° a 90° cada 5°. Para este trabajo se consultaron los antecedentes sobre tribómetros utilizados en investigaciones previas, con el fin de definir la ingeniería de detalle y la construcción del equipo. Se realizaron pruebas de desgaste erosivo en una aleación de aluminio con tratamiento térmico de envejecido, donde se comparó entre la línea de tendencia obtenida de la gráfica tasa de desgaste en función del ángulo de impacto, y la línea de tendencia de la gráfica del artículo *Design of a Slurry Erosion Test Rig*. Asimismo, se compararon los datos obtenidos con una configuración de tribómetro de cilindro rotatorio, con el objetivo de analizar las diferencias que presentaban los resultados en cada una de las configuraciones. Para los ángulos de impacto de 45° y 90° se identificaron los mecanismos de desgaste y se encontró que en el ángulo 45° se presentó micro corte, deformación plástica e inclusión de partículas; mientras que en 90° se presentó deformación plástica y micro fatiga.

Los ensayos en el tribómetro construido se realizaron con *slurry* compuesto por agua y arena tipo cuarzo entre 600-1000 micras con una concentración del 17%, y se obtuvo una velocidad promedio de 122,39 m/s que se calculó a partir de la geometría de la boquilla y los flujos másicos de *slurry* y aire. Al comparar los ensayos realizados en el equipo con los ensayos del artículo *Design of a Slurry Erosion Test Rig*, se presentó un comportamiento similar. Además, la dispersión de los datos obtenidos en los ensayos se redujo en comparación con el tribómetro de cilindro rotatorio. Los resultados mostraron que el ángulo donde se produjo la máxima tasa de desgaste para las dos configuraciones evaluadas fue a 45°, pero se encontró que el tribómetro de cilindro rotatorio no es la configuración más adecuada para realizar pruebas de desgaste erosivo en función del ángulo, porque que la línea de tendencia de la gráfica no se comportó de acuerdo a lo encontrado en la literatura y se presentó mucha dispersión en los datos.

Palabras claves: *slurry*, erosión, tribómetro, diseño, construcción, aleación de aluminio.

1. INTRODUCCIÓN

El desgaste erosivo es la remoción de material o pérdida de masa producida en una superficie por el impacto continuo de partículas abrasivas inmersas en un fluido; ya sea un líquido o un gas. Este fenómeno se presenta con frecuencia en componentes de máquinas encargados de la transferencia de fluidos; como lo son las turbinas hidráulicas, bombas, compresores, entre otros, los cuales se utilizan en diversas aplicaciones de la ingeniería.

Por lo general, este tipo de desgaste no se detecta fácilmente debido a que en principio sus efectos pueden ser imperceptibles; en consecuencia, los componentes de las máquinas se deterioran, pierden sus tolerancias, dejan de funcionar de forma adecuada y tienen que ser reemplazados, afectando de esta manera la productividad y el buen funcionamiento de una máquina.

En las turbinas hidráulicas es usual la presencia de este fenómeno que deja como consecuencia la disminución de la eficiencia de los equipos, reparaciones y paradas de máquina no programadas, lo cual genera altos sobrecostos. En las estaciones hidroeléctricas se ha reportado que los daños por desgaste erosivo han generado pérdidas de 120 a 150 millones de dólares anuales [1]. Por tanto, ha sido necesario implementar en los procesos de diseño el uso de bancos de pruebas (tribómetros de *slurry* erosión), con el fin de evaluar el comportamiento y desempeño de los elementos de las máquinas.

Los tribómetros en su mayoría se producen en países extranjeros y se venden a precios elevados, lo cual dificulta la adquisición de estos equipos, y permite que los países extranjeros tomen ventaja en los procesos de investigación y a su vez que se cree una dependencia industrial. Por esta razón, se ha optado por construir los equipos dentro del país. Además, al realizar el diseño y la construcción del equipo, se tendrá pleno conocimiento de su funcionamiento y esto posteriormente permitirá sortear con mayor facilidad las reparaciones o mantenimientos que la máquina requiera.

En este trabajo se propone el diseño de un tribómetro de chorro de agua, en el cual, se puedan simular los efectos de desgaste erosivo que afectan a las turbinas hidráulicas. Este equipo se construyó para el laboratorio de tribología de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle y está capacitado para variar la concentración de las partículas, la velocidad de chorro y el ángulo de impacto.

Para evaluar el funcionamiento del tribómetro se realizaron pruebas donde se varió el ángulo de ataque; seguido a esto, se cuantificaron y analizaron los efectos de desgaste por erosión producidos en un material reportado en la literatura, adicionalmente se efectuaron pruebas bajo las mismas condiciones de ángulo y concentración de partículas en el tribómetro de cilindro rotatorio construido por Chávez [2], para establecer las diferencias entre los bancos de pruebas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y evaluar un tribómetro de chorro de agua a partir de la adaptación del equipo de *sand-blasting*, en el cual se pueda variar la concentración de las partículas, la velocidad de chorro y el ángulo de impacto entre 0° y 90° cada 5°.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la ingeniería conceptual, básica y de detalle de los componentes del tribómetro.
- Construir el tribómetro.
- Diseñar el procedimiento de calibración y uso para operar el tribómetro en diferentes ángulos de impacto y concentraciones de partícula.
- Evaluar el desgaste erosivo de un material de calibración documentado en la literatura identificando el ángulo crítico de desgaste.
- Evaluar el desgaste erosivo de un material de calibración con el tribómetro de impulsor rotatorio para al menos cuatro ángulos de impacto diferentes.
- Comparar los resultados de desgaste obtenidos en el tribómetro de chorro de agua con el tribómetro de impulsor rotatorio para las mismas condiciones de ensayo.
- Identificar los mecanismos de desgaste.

3. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

3.1 MARCO TEÓRICO

3.1.1 Desgaste erosivo

El desgaste por erosión ha afectado a una gran cantidad de componentes mecánicos y máquinas, pero sólo hasta hace poco se comenzaron a estudiar y analizar sus efectos. Puesto que, se ha convertido en un problema serio para muchas industrias.

En el año 1963, Bitter [3] propuso que el desgaste se podía generar de dos formas; por corte o por deformación y que el desgaste a cualquier ángulo resulta ser la suma de estas dos componentes. Según la teoría de Bitter el desgaste por corte era causado por la componente de velocidad paralela a la superficie impactada y la componente normal de la velocidad era la responsable del desgaste por deformación.

Cuando las partículas impactan un material, lo pueden hacer de varias formas dependiendo de su velocidad y ángulo de impacto. Estos tipos de impacto generados por las partículas se conocen como micro mecanismos de desgaste y su clasificación se muestra en la Ilustración 1.

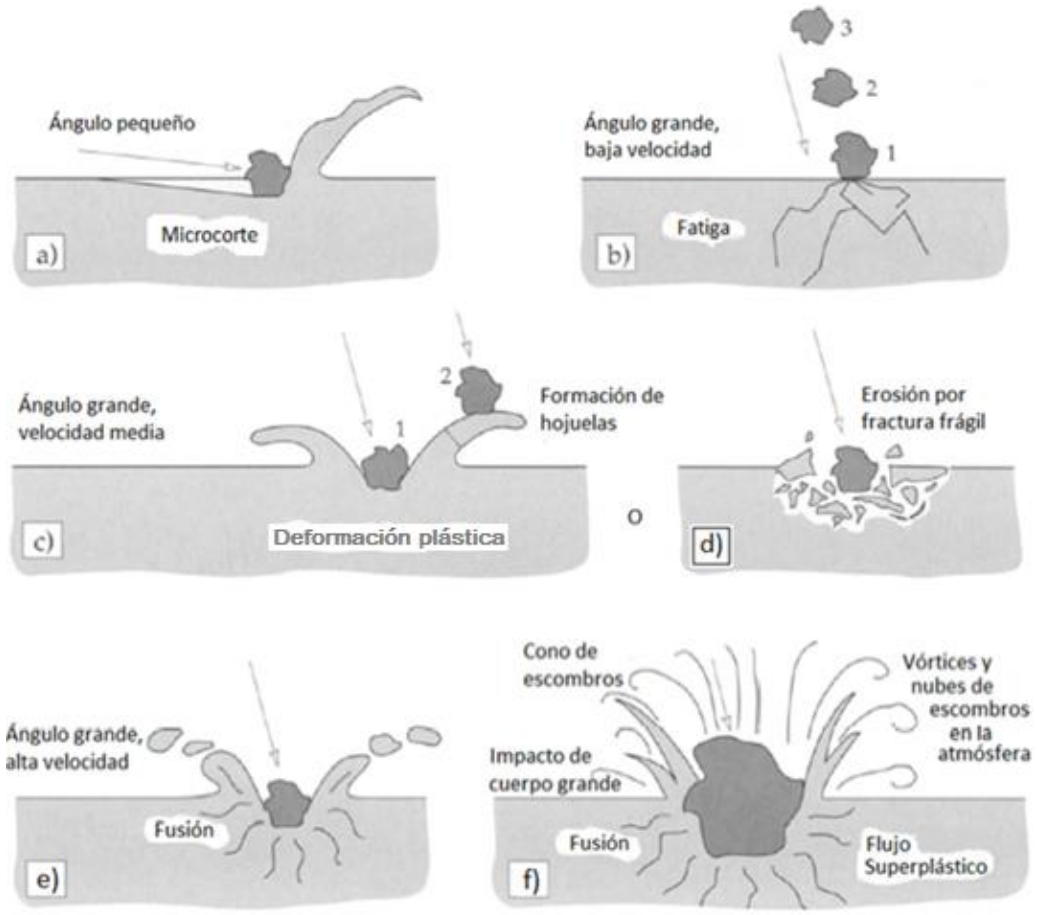
Muchos investigadores han propuesto correlaciones empíricas para la estimación del desgaste erosivo basado en un gran número de datos experimentales desarrollados a través de bancos de pruebas de laboratorio. La correlación empírica general se expresa mediante la ecuación 1 como:

Ecuación 1.

$$\boldsymbol{E_w = KV^{\beta} d^{\gamma} C^{\varphi} f(\alpha)}$$

Donde E_w es la tasa de erosión; V la velocidad; d el tamaño de la partícula; C la concentración de partículas; $K\ \beta\ \gamma\ y\ \varphi$ son constantes cuyos valores están en función del fluido y de las propiedades de las partículas y del material a impactar. Los valores de estas constantes varían en un amplio rango. Por esta razón, hasta el momento no existe una correlación universal para el desgaste [4].

Ilustración 1. Micro mecanismos de desgaste posibles de erosión; a) micro corte que se presenta con más frecuencia a ángulos bajos de impacto, b) micro fatiga superficial que se presenta con más frecuencia a velocidad baja y ángulo de impacto grande, c) múltiple deformación plástica que se presenta con mayor frecuencia velocidad media y ángulo de impacto, d) grande micro fractura frágil, e) fusión de la superficie a grandes velocidades de impacto, f) erosión macroscópica con efectos secundarios. [5]



3.1.1.1 Desgaste por slurry erosión

El desgaste por *slurry* erosión es un proceso en el cual se degrada una superficie que está siendo impactada por un chorro de líquido (en la mayoría de los casos agua), en el cual se encuentran inmiscuidas partículas sólidas a velocidades superiores a 1 m/s [6].

Se denomina *slurry* erosión de alta velocidad cuando la velocidad del chorro alcanza valores por encima de los 6-9 m/s. Para valores inferiores a estos, se dice que es *slurry* erosión de baja velocidad [6].

Existen varios factores que afectan este tipo de desgaste y se pueden categorizar en tres tipos [7] [8]:

1 Factores correspondientes a las condiciones de operación:

En esta categoría se considera la velocidad, el ángulo de impacto, el tipo de flujo, la viscosidad de fluido y la concentración de las partículas.

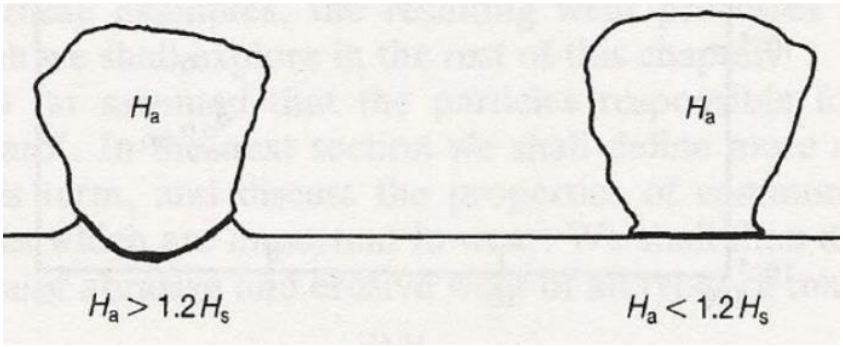
2 Factores correspondientes al material que es impactado:
En esta categoría se considera la composición, microestructura, dureza, tenacidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y endurecimiento por deformación. Si el material tiene recubrimientos se incluyen factores como la porosidad y adhesión al sustrato.

3 Factores correspondientes a las partículas:

En esta categoría se considera la composición, dureza, forma y tamaño de las partículas. Aunque aún no se ha definido una correlación universal, muchos estudios [4], [9], [1] han establecido las siguientes conclusiones:

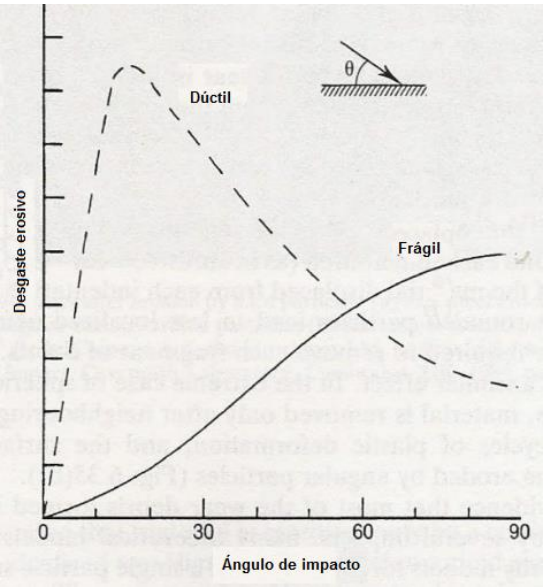
El desgaste depende de la dureza del material impactado y de la dureza de las partículas inmersas en el fluido. Se presenta mayor desgaste cuando aumenta la relación entre la dureza de las partículas y la dureza del material [4]. Se encuentra que para que el impacto de la partícula no afecte el material esta relación debe ser menor a 1,2 [9] como se muestra en la ilustración 2.

Ilustración 2. Contacto entre una partícula y una superficie plana bajo carga normal. **[9]**



Para materiales dúctiles el desgaste es 3 o 4 veces mayor cuando este es impactado por las partículas en ángulos que varíen entre 15° a 30° [1], mientras que para materiales frágiles se presenta mayor desgaste cuando las partículas impactan en ángulos mayores de 60° a 90°, esta relación entre desgaste erosivo y ángulo de ataque se puede observar en la ilustración 3.

Ilustración 3. Desgaste erosivo en función del ángulo de impacto para materiales dúctiles y frágiles**.** [9]



Otro de los factores que influyen en el desgaste erosivo es el tamaño y forma de las partículas que impactan el material, siendo mayor cuando el impacto es realizado con partículas de mayor tamaño. Asimismo, se presentan incrementos en desgaste cuando el factor de forma de las partículas es lejano a 1. Esto quiere decir, cuando la forma de las partículas es angulosa [4].

Para calcular el factor de forma de las partículas se utiliza la Ecuación 2, la cual por medio de una relación entre el área proyectada de la partícula y su perímetro, obtiene un valor que determina si la forma de la partícula es angulosa o por el contrario redonda. Este valor varía de 0 a 1; entre más cercano este a 1, más redonda es la forma de la partícula. En la Ilustración 4 se puede ver la morfología y el valor calculado del factor de forma para partículas de cuarzo, carburo de silicio y alúmina. Donde se observa que las partículas de alúmina son más angulosas, seguida de las partículas de carburo de silicio y finalmente las de cuarzo.

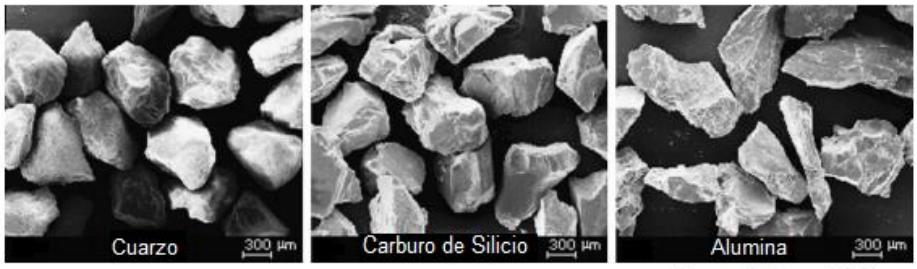
Ecuación 2. Cálculo del factor de forma para partículas.

$$\boldsymbol{Factor\ de\ forma} = \frac{\boldsymbol{4\,\pi\ área\ proyectada}}{\boldsymbol{perimetro^2}}$$

Para esferas

$$\boldsymbol{Factor\ de\ forma} = \mathbf{1}$$

Ilustración 4. Microscopía electrónica de barrido de partículas con diferentes morfologías. **[4]**



Factor de forma 0.70 Factor de forma 0.44 Factor de forma 0.34

3.1.2 Cálculo de la densidad del *slurry*

La densidad de una mezcla líquido-sólido se puede calcular por medio de la Ecuación 3, siendo X_i la fracción en masa del componente *i* presente en la mezcla y ρ_i su densidad

Ecuación 3. Ecuación general para el cálculo de la densidad de una mezcla. [10]

$$\frac{1}{\rho_{mezcla}} = \sum \left(\frac{X_i}{\rho_i}\right)$$

Teniendo en cuenta que para el *slurry* $X_{arena} + X_{agua} = 1$, correspondiendo al 100% de las componentes y que las densidades del agua y la arena utilizada en las pruebas realizadas son de 1000 Kg/m^3 y 1600 Kg/m^3 respectivamente, se obtiene la Ecuación 4.

Ecuación 4. Cálculo de la densidad del *slurry*.

$$\frac{1}{\rho_{mezcla}} = \frac{X_{arena}}{\rho_{arena}} + \frac{X_{agua}}{\rho_{agua}}$$

3.1.3 Cálculo de la densidad de una mezcla de *slurry* con aire.

La densidad de un flujo bifásico se puede calcular por medio de la Ecuación 5 y Ecuación 6, siendo ρ_G y Q_G la densidad y el caudal del gas y ρ_L y $Q_L$la densidad y el caudal del líquido.

Ecuación 5. Cálculo de densidad para un flujo bifásico. **[11]**

$$\frac{1}{\rho_{FB}} = \frac{X}{\rho_G} + \frac{1-X}{\rho_L}$$

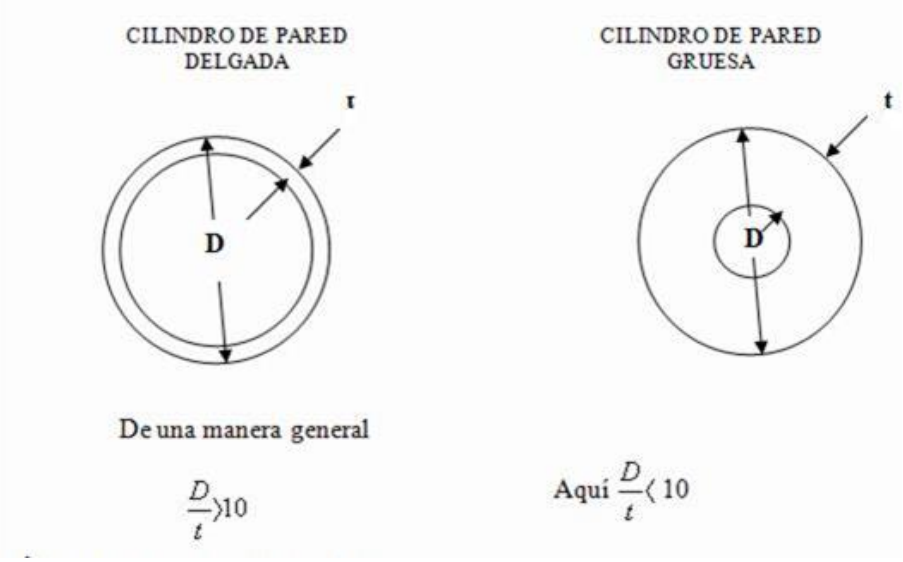
Ecuación 6. Fracción másica de gas. **[11]**

$$X = \frac{\rho_G Q_G}{\rho_G Q_G + \rho_L Q_L}$$

3.1.4 Cilindros de pared delgada sometidos a presión.

Un cilindro sometido a presión se considera de pared delgada cuando la relación entre el diámetro exterior y el espesor es mayor a 10 [11], de lo contrario se considera de pared gruesa (ver Ilustración 5).

Ilustración 5. Criterio para diferenciar cilindros de pared gruesa y delgada. [12]



Para realizar el análisis del cilindro de radio r y espesor t, mostrado en la Ilustración 6, el cual está sometido a una presión interna P, se tienen las ecuaciones de esfuerzos en las direcciones θ, r y z, mostradas en la Ecuación 7

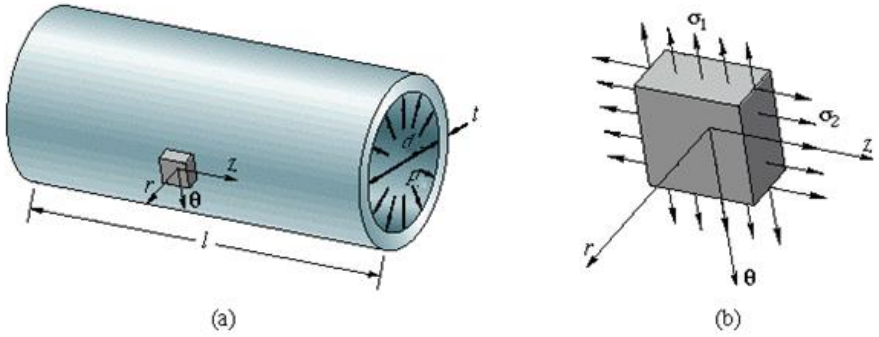
Ecuación 7. Esfuerzos en el cilindro de pared delgada. **[13]**

$$\sigma_\theta = \frac{Pr}{t} \quad ; \quad \sigma_\theta = \sigma_1$$

$$\sigma_z = \frac{Pr}{2t} \quad ; \quad \sigma_z = \sigma_2$$

$$\sigma_r = 0 \quad ; \quad \sigma_r = \sigma_3$$

Ilustración 6. Cilindro de pared delgada sometido a presión. (a) esfuerzos que actúan sobre el cilindro, (b) esfuerzos que actúan sobre un elemento. **[13]**



Criterio de la máxima energía de distorsión o criterio de Von Mises: Es un criterio de resistencia estática, aplicado a materiales dúctiles, según el cual, el material no fluirá en el punto analizado siempre que la energía de distorsión por unidad de volumen en el punto no supere la energía de distorsión por unidad de volumen que se da en el momento de la fluencia en el ensayo de tracción [14]. La descripción matemática de este criterio se muestra en la Ecuación 8

Ecuación 8. Criterio de Von Mises. **[14]**

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2}} < \sigma_y$$

Para el cálculo del factor de seguridad utilizando el criterio de Von Mises se utiliza la Ecuación 9.

Ecuación 9. Cálculo del factor de seguridad. **[14]**

$$FS = \frac{\sigma_y}{\sigma_V}$$

3.1.5 Cálculo de la velocidad tangencial de un fluido incompresible en el espacio entre dos cilindros.

Para calcular la velocidad tangencial de un fluido incompresible en el espacio entre dos cilindros, se utilizó la ecuación de continuidad expresadas en coordenadas cilíndricas (Ecuación 10) y las ecuaciones de movimiento (Ecuación 11)

Ecuación 10. Ecuación de continuidad en coordenadas cilíndricas. **[15]**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z) = 0$$

Ecuación 11. Ecuaciones de movimiento. **[15]**

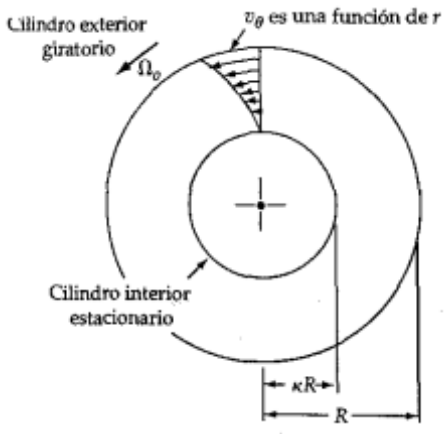
Componente r $$\rho\left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r v_r)\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right] + \rho g r$$

Componente θ $$p\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r\frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z\frac{\partial v_\theta}{\partial z}\right) = -\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r v_\theta)\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2}\frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2}\right] + \rho g \theta$$

Componente z $$\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right] + \rho g z$$

En la Ilustración 7 se muestra una configuración en la que se encuentran dos cilindros, uno de ellos; el interno, se encuentra estacionario, mientras que el externo se mueve a una velocidad angular Ω_θ.

Ilustración 7. Configuración de un flujo laminar incompresible en el espacio entre dos cilindros. **[15]**



Considerando el *slurry* como un flujo laminar compresible y que las partículas se mueven a la misma velocidad del agua. Además, debido a que el flujo se mueve de manera circular, se realizan los siguientes supuestos:

- Las componentes de la velocidad en r y z son 0. La dirección z en Ilustración 7 se muestra perpendicular al plano Θ y r.

- No existe gradiente de presión en la dirección Θ. Los gradientes de presión corresponden a z debido a la gravedad y a r debido a la fuerza centrífuga.

Para los anteriores supuestos, todos los términos de la ecuación de continuidad son cero y las componentes de la ecuación de movimiento se simplifican a:

Ecuación 12. Ecuación de movimiento simplificada, componente $\boldsymbol{r}$.

$$-\rho \frac{v_\theta^2}{r} = -\frac{\partial p}{\partial r}$$

Ecuación 13. Ecuación de movimiento simplificada, componente θ.

$$\mathbf{0} = \frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dr}}\left(\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{r}}\frac{\boldsymbol{d}}{\boldsymbol{dr}}(\boldsymbol{r v_\theta})\right)$$

Ecuación 14. Ecuación de movimiento simplificada, componente $\boldsymbol{z}$.

$$0 = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g$$

De las tres ecuaciones se escoge la Ecuación 13, puesto que es las que describe el movimiento en θ.

Se utilizan las siguientes condiciones de borde, las cuales se pueden identificar en la Ilustración 7.

$$v_\theta(r = kR) = 0 \; ; \; v_\theta(r = R) = \Omega_\theta R$$

Se obtiene que:

$$v_\theta(r) = \Omega_\theta R \frac{\left(\frac{R}{r} - \frac{r}{R}\right)}{\left(\frac{1}{k} - k\right)}$$

3.2 ANTECEDENTES

3.2.1 Tribómetros de *slurry* erosión construidos en la Universidad del Valle.

Hasta el momento en la Universidad del Valle se han construido tres tribómetros de erosión; dos de ellos, construidos por Caicedo [16] y Vargas [17], tienen como objetivo estudiar el comportamiento de los materiales frente a la corrosión-erosión; mientras que el otro, construido por Chávez [2] evalúa el comportamiento del material frente a la erosión.

El tribómetro construido por Caicedo [16] utiliza un motor trifásico de 3400 rpm acoplado a un eje de polietileno que tiene como función agitar el *slurry* para evitar la sedimentación de las partículas y que de esta manera ocurrieran cambios en la concentración. El *slurry* utilizado en las pruebas es almacenado en un recipiente de vidrio con borde de caucho para evitar derrames del fluido; este se sella con una tapa que tiene agujeros donde se posiciona el porta-probetas; estos agujeros dan la posibilidad de posicionar la probeta a 30° 60° y 90° [16], la disposición de la maquina se puede observar en la Ilustración 8.

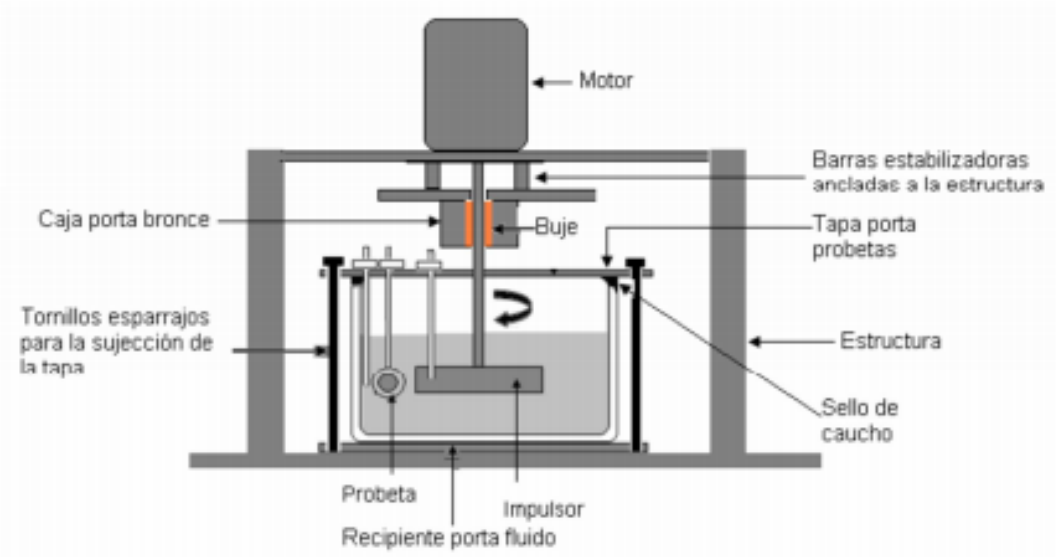
El tribómetro tenía una estructura metálica, la cual evitaba que el eje se desbalanceara cuando el rotor estuviera girando. Esta estaba unida al eje del motor por medio de un buje de bronce el cual tenía que lubricarse antes de dar inicio a cada prueba [16].

En la actualidad este equipo se encuentra en desuso, debido a que generaba vibraciones excesivas que ocasionaban derrames constantes del *slurry*, lo cual impedía realizar de manera adecuada las pruebas.

Ilustración 8. Tribómetro de corrosión-erosión construido por Caicedo. **[16]**



Ilustración 9. Esquema del tribómetro de corrosión-erosión de Caicedo. **[16]**

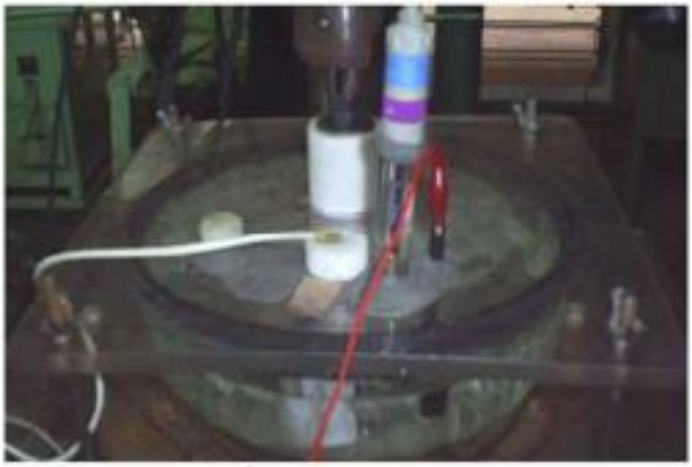


El tribómetro construido por Vargas [17] funciona bajo los mismos principios del tribómetro anteriormente mencionado, las diferencias más relevantes entre ambos radican en que éste utiliza un taladro en vez de un motor trifásico y las posiciones permitidas para las probetas son solamente 30° y 90° [17].

Para cada prueba se controlaba la duración del ensayo con un cronómetro digital y la velocidad de impacto de las partículas por medio de un sistema de poleas y bandas, con el cual se podían variar las velocidades del eje a 1930, 2420, 2700 y 3850 rpm [17]. Las principales desventajas de este diseño eran que los rangos de variación de las velocidades y

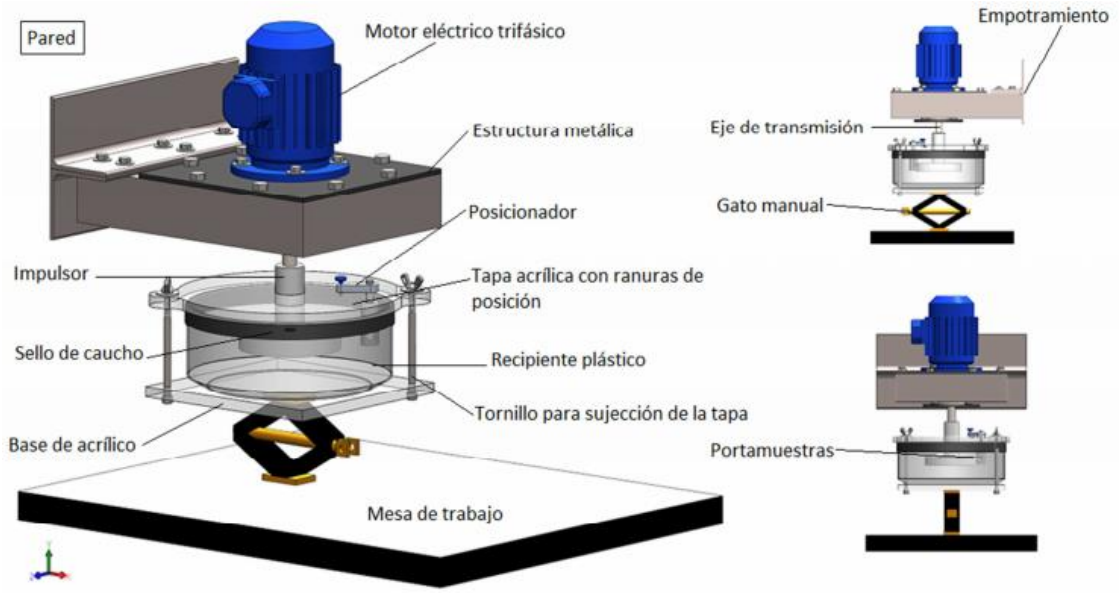
ángulos de impacto eran limitados; además, este equipo era muy robusto y presentaba vibraciones excesivas causadas posiblemente por el desbalanceo de las poleas. [2]

Ilustración 10. Tribómetro de corrosión-erosión construido por Vargas. **[17]**



Actualmente, este dispositivo se encuentra en la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle. A diferencia de los tribómetros de Caicedo [16] y Vargas [17], el banco de pruebas construido por Chávez [2] tiene como objetivo evaluar el comportamiento de los materiales sometidos sólo a erosión. Aunque este equipo funciona bajo el mismo principio que los anteriormente mencionados.

Ilustración 11. Tribómetro de erosión construido por Chávez. **[2]**

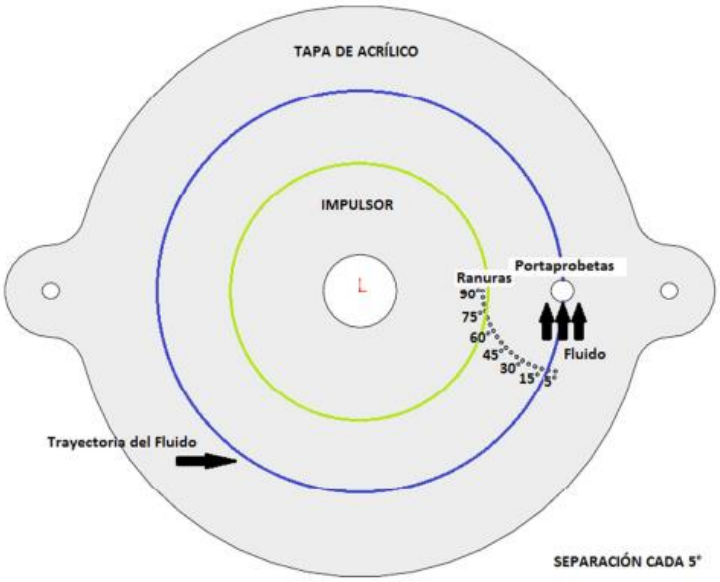


Este diseño presenta mejoras puesto que esta soportado en una estructura rígida empotrada a la pared la cual minimiza las vibraciones producidas en los ensayos (Ilustración 11). También, se aumenta el rango de las variables de velocidad y posicionamiento de las probetas, ya que utiliza un variador electrónico de frecuencia, el cual permite un amplio rango de velocidades y tener control sobre la velocidad de impacto de las partículas; además, el diseño de la tapa permite realizar ensayos de 5° a 90° variando cada 5° [2] la cual se puede visualizar en la Ilustración 12.

Este tribómetro se encuentra actualmente en el laboratorio de tribología de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle. Cabe mencionar que los tres equipos mencionados anteriormente son de cilindro rotatorio y hasta el momento no se ha construido en la universidad un tribómetro tipo chorro de agua.

Es pertinente la construcción de un tribómetro tipo chorro de agua, debido a que se desea analizar el desgaste producido en las turbinas hidráulicas, y en general los tribómetros de cilindro rotatorio están restringidos por su configuración a alcanzar velocidades muy bajas (por debajo de los 10 m/s) en comparación con las alcanzadas en el interior de una turbina hidráulica.

Ilustración 12. Diseño de la tapa. **[2]**



3.2.2 Tribómetros de *slurry* erosión tipo chorro de agua

Los tribómetros tipo chorro de agua se han utilizado en diferentes investigaciones de *slurry* erosión (algunas de ellas se encuentran referenciadas en la columna seis de la Tabla 1), debido que en ellos se puede tener un mayor control de las condiciones de operación como el ángulo de impacto, velocidad y concentración. Cabe anotar que como desventaja, estos tipos de tribómetros presentan un diseño y montaje más complejo que los de cilindro rotatorio.

Los tribómetros de chorro de agua se pueden clasificar en los que recirculan (RC) y los que no recirculan el *slurry* (NRC) [18]. En los (RC) las partículas circulan una y otra vez en los diferentes ciclos que dura un ensayo, mientras que los (NRC) no reutilizan las partículas, lo cual elimina el error que se puede inducir debido a la fractura y cambio de forma que pueden sufrir las partículas durante las pruebas.

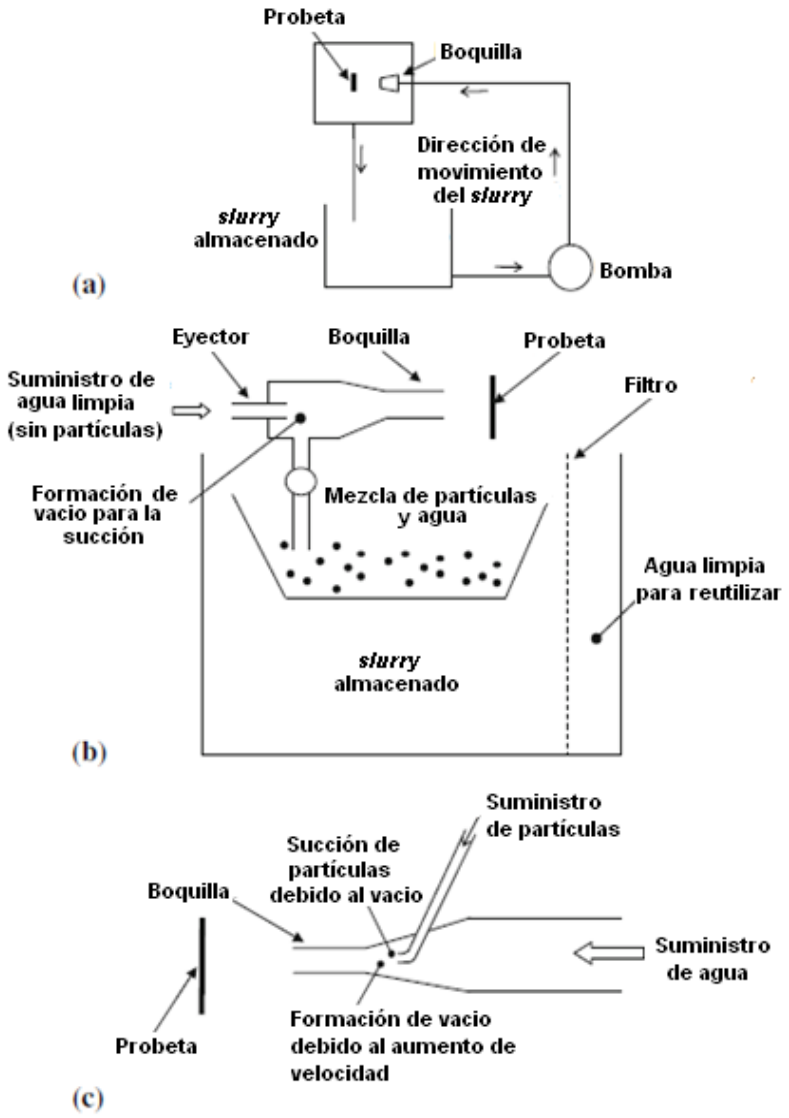
Por otra parte, los tribómetros (RC) tienen una construcción y modo de operación más simple; además, reducen el consumo de agua y partículas para cada ensayo, pero presentan un problema en cuanto al control de la concentración de las partículas, puesto que la energía mecánica producida por el sistema de bombeo genera un incremento en la temperatura del *slurry*, lo cual tiende a evaporar el líquido (agua) presente en éste, teniendo como resultado una variación en la concentración del *slurry* [18].

La Ilustración 13 muestra de manera esquemática algunos de los tribómetros de chorro de agua utilizados en investigaciones previas, nombrando las desventajas o limitaciones presentadas en estos equipos.

En la Tabla 1 se muestra de manera detallada las condiciones de operación de algunos de los tribómetros de chorro de agua utilizados en investigaciones previas de *slurry* erosión. Se puede observar que la velocidad máxima reportada fue 150 m/s, obtenida en el tribómetro (RC) utilizado por Baena [19], aunque esta velocidad se obtuvo con una concentración de *slurry* del 0% (agua sin partículas).

De la misma manera, en la Tabla 1 se muestra que la máxima concentración de partículas reportada fue del 30% y se obtuvo en el tribómetro semi (RC) utilizado por Zu et al [20] con una velocidad de 8 m/s y en el tribómetro (RC) utilizado por Yngve [21] con una velocidad de 30m/s.

Ilustración 13. Representación esquemática de los diferentes tipos de tribómetros de chorro de agua utilizados: (a) Tribómetro RC generalmente usado, (b) Tribómetro NRC propuesto por Zu et al [20], y (c) Tribómetro NRC utilizado por Lin et al [22] y Santa et al [23].



Limitaciones

- La degradación de partículas ocasiona cambios en las condiciones iniciales
- No se controla la concentración

Limitaciones

- Interdependencia entre la concentración y la velocidad
- Leve degradación de partículas
- Complejidad en el diseño de la boquilla

Limitaciones

- Interdependencia entre la concentración y la velocidad
- No es posible el uso de concentraciones altas
- Complejidad en el diseño de la boquilla

Tabla 1. Condiciones de operación de los tribómetros de chorro de agua encontrados en la literatura. [18]

Tipo	Máxima Velocidad m/s	Concentración wt. %	Tamaño de probeta mm x mm	Diámetro boquilla mm	Referencia
Semi (RC)	8	30	30 x 35	4,5-6,5	[20]
(NRC)	117,3	0,0028-0,0017	20 x 20	4	[22]
(RC)	30	2,1	40 x 40	6-10	[24]
(RC)	15,2	25	…	1,8	[25]
(RC)	17	20	25 x 26	4,76	[26]
(RC)	30	30	…	2	[21]
(RC)	17	0,05	…	4	[27]
(NRC)	75	0,4	45 x 17	5	[23]
(RC)	27	0,75	40 x 40 o 22 x 68	Variable	[28]
(RC)	150	0-0,1	…….	Variable	[19]

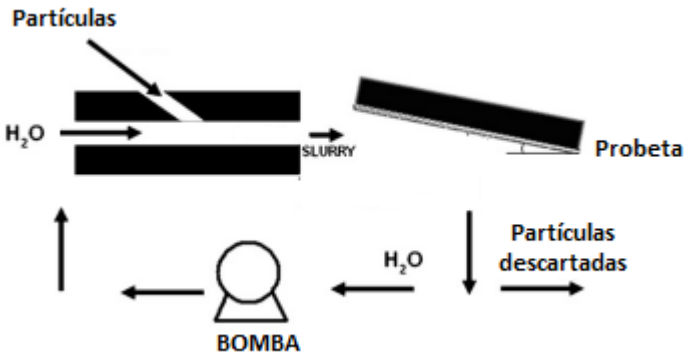
En la Ilustración 13 (a) se muestra una representación de los tribómetros (RC) que son los más comúnmente utilizados, como se puede observar en la Tabla 1. En estos equipos, el *slurry* después de impactar la probeta, cae en el interior de un taque que almacena la mezcla, la cual posteriormente pasa a través de una bomba que se encarga de enviarla nuevamente a la boquilla para impactar la probeta. Este diseño a pesar de ser funcional, presenta una falla grande y es que permite el ingreso de las partículas en la bomba, lo que causa su deterioro rápidamente. Además, se considera algo paradójico investigar el desgaste erosivo por *slurry* erosión, en equipos que reproducen el mismo problema.

De los tribómetros mencionados en la Tabla 1, el propuesto por Zu et al en su artículo *"Design of a Slurry Erosion Test Rig"* [20] se ha implementado en un gran número de investigaciones ([29], [30], [31], [32]). En este equipo, el *slurry* después de impactar la probeta cae en el interior de un contenedor, en el cual la mayoría de las partículas tienden a sedimentarse, y las restantes que siguen mezcladas con el agua, pasan a través de un filtro, con el fin de dejar el agua libre de impurezas, antes de entrar a una bomba que conduce el agua hacia la boquilla. A su vez, la arena que había quedado sedimentada en el interior del contenedor es succionada por una válvula hasta la boquilla, para formar nuevamente en su interior la mezcla de *slurry* e impactar la probeta. El esquema de funcionamiento de este equipo se muestra en la Ilustración 13(b).

En la Ilustración 14 se muestra una representación del tribómetro (NRC) utilizado por Santa et al. En este equipo se tiene una boquilla con dos entradas; una de agua y otra de arena como se muestra en la Ilustración 13 (c). La boquilla de este equipo presenta una

configuración diferente a la del semi (RC) de Zu et al [20], pues la entrada de arena se encuentra ubicada en la parte superior y de manera transversal en dirección al flujo, con el fin de facilitar la entrada de la arena a la boquilla. A diferencia del tribómetro semi (RC) de Zu et al [20], en este equipo sólo se recircula el agua, y se realiza un llenado constate de partículas nuevas en la boquilla.

Ilustración 14. Esquema del tribómetro de *slurry* erosión (NRC) utilizado por Santa et al. **[23]**



4. DISEÑO Y MANUFACTURA DEL TRIBÓMETRO

En el desarrollo de esta etapa se realizó una búsqueda de tribómetros de chorro de agua construidos en investigaciones previas, para luego plantear la propuesta de diseño, donde se tuvo como prioridad cumplir los requerimientos inicialmente propuestos en los objetivos del proyecto. Posterior a la propuesta de diseño, se llevó a cabo la selección de materiales y cálculos requeridos para dar inicio a la construcción.

El grupo de Investigación en Fatiga y Superficies de la Universidad del Valle en una de sus áreas de interés, estudia el desgaste erosivo producido en las turbinas hidráulicas, por tanto, se ha creado la necesidad de construir bancos de pruebas (tribómetros) en los cuales se puedan llevar a cabo estas investigaciones.

Actualmente, el grupo de Investigación cuenta con un tribómetro de *slurry* erosión tipo cilindro rotatorio, pero este, por su configuración presenta las siguientes restricciones:

- Aumento de la temperatura del *slurry* durante las pruebas.
- Las partículas de mayor tamaño se desplazan a la parte externa del recipiente debido a la fuerza centrífuga.
- La máxima velocidad en el equipo es de aproximadamente 9 m/s, siendo ésta muy baja en comparación con las velocidades alcanzadas en las turbinas hidráulicas que son del orden de 100 m/s.

El diseño del tribómetro se llevó a cabo siguiendo el cronograma de actividades de la Ilustración 15.

Ilustración 15. Diagrama de actividades para el diseño del tribómetro.



4.1 CONSULTA DE ANTECEDENTES

Inicialmente, tal como lo indica el diagrama de la Ilustración 15, se realizó una búsqueda de antecedentes en la literatura que se encuentra resumida en el numeral 3.2.2 de este trabajo, los diseños allí mencionados se tomaron como referencia y fueron mejorados en varios aspectos:

- Se puede alcanzar una concentración alta de partículas; hasta del 30%, como se puede observar en la Tabla 4 donde se muestra una concentración alcanzada en el equipo de 35,7%.

- Es un diseño innovador, funcional, simple y económico, el cual, a diferencia de los demás, sólo requiere de aire comprimido para su funcionamiento.

4.2 REQUERIMIENTOS DEL TRIBOMETRO

Para el proyecto, se planteó el diseño y la construcción de un tribómetro que se adaptara al dispositivo de *sand-blasting.* El equipo debía estar capacitado para:

- Lograr variaciones en la velocidad cercanas a las que se producen en las turbinas hidráulicas.

- Variar la concentración de partículas.

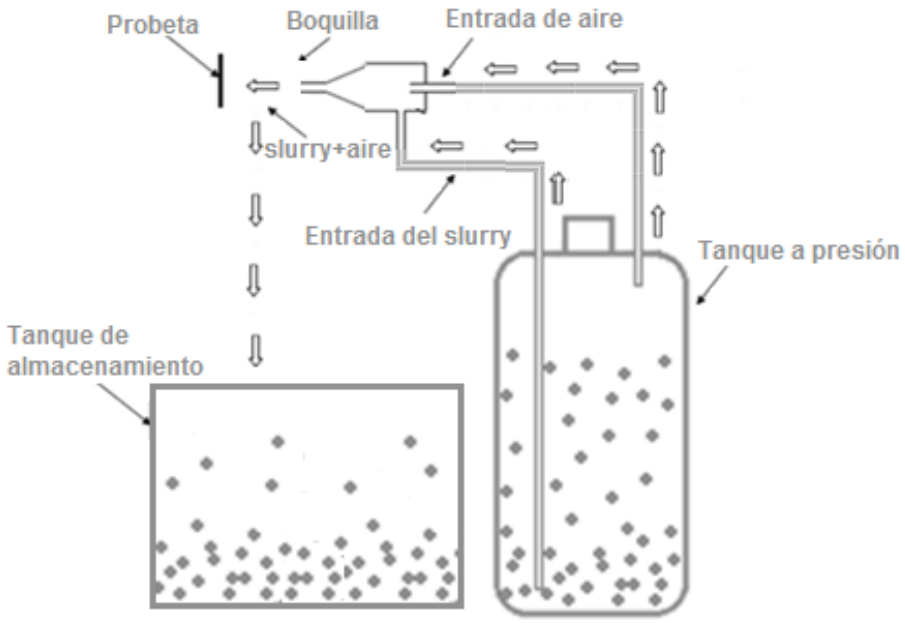
- Variar el ángulo de impacto entre 0° y 90° cada 5°.

También, se propuso que el tribómetro fuera (RC); es decir, que recirculara el *slurry* (agua y arena), debido a que de no ser así, se hubieran requerido grandes cantidades de agua y arena para llevar a cabo todos los ensayos, lo cual no hubiera sido pertinente porque se desperdiciaba mucha agua y se incrementaban los costos por prueba al necesitar más arena.

4.3 INGENIERÍA BÁSICA

Posterior a los procesos de búsqueda de antecedentes y definición de requerimientos, se planteó la ingeniería básica en la cual se describen las partes principales que componen el tribómetro. A continuación se describirá con mayor detalle cada una de ellas.

Ilustración 16. Esquema del tribómetro construido.



Cabina: para evitar la contaminación ocasionada por el *slurry* fue necesaria la construcción de una cabina, dentro de la cual se lleven a cabo los ensayos. El diseño de la cabina se hizo teniendo en cuenta que también sirviera para la preparación de superficies mediante la técnica de *sand blasting.* Esta se compone de una estructura metálica, una ventana, unos guantes, una puerta lateral y una parrilla.
La estructura metálica se puede observar en el la imagen (a) de la Ilustración 17. Se determinó que la fabricación de la estructura fuera en acero inoxidable para evitar el deterioro ocasionado por la corrosión. Este material se encontraba disponible en el laboratorio de procesos de manufactura.

La cabina en su totalidad tiene una altura de 1,47m y un área de 0,70m x 0,40m. Está compuesta por 15 láminas de acero inoxidable AISI 304 de 2mm de espesor soldadas entre sí con soldadura tipo SMAW, ocho perfiles en ángulo de acero estructural A36 que forman el soporte de inferior de la cabina, tuercas y tornillos en acero inoxidable.

Ilustración 17. Cabina. (a) estructura metálica de la cabina (b) parrilla y guantes de la cabina (c) vista lateral de la cabina.



- Ventana: Es de suma importancia cerciorarse de que los ensayos se estén realizando de la manera adecuada, por esta razón, se optó por hacer una ventana a la cabina. Para la ventana se seleccionó un vidrio de 6mm de espesor con recubrimiento plástico en una de sus caras, la cual va estar expuesta al impacto constante de las partículas durante los ensayos. La ventana tiene un marco de acero inoxidable que la sostiene y va atornillado a la estructura metálica.

- Guantes: En la Ilustración 17 (b) se pueden apreciar dos agujeros, en los cuales se encuentran sujetos unos guantes hechos en carnaza. Estos no se utilizaron en los ensayos de *slurry* erosión, pero son de gran importancia en el proceso de *sand blasting*, pues permiten introducir las manos en la cabina para sostener las piezas sin tener contacto directo con el abrasivo.
- Parrilla: Se puede observar de color negro en la imagen (b) de la Ilustración 17. La parrilla se encuentra en el interior de la cabina y es una pieza independiente de la cabina (puede quitarse si se desea), tiene como función sostener el porta-probetas, el cual describiremos en detalle más adelante.

- Puerta lateral: Esta se encuentra en la parte izquierda de la cabina, como se puede apreciar en la Ilustración 17 (c). La puerta lateral tiene como función permitir el ingreso del porta-probetas cuando se van a realizar los ensayos de *slurry* erosión.

Porta-probetas: Se construyó un soporte en el cual se pudiera ubicar la probeta durante los ensayos, y que este, a su vez pudiera variar los ángulos de impacto en la probeta de 0° a 90° cada 5°.

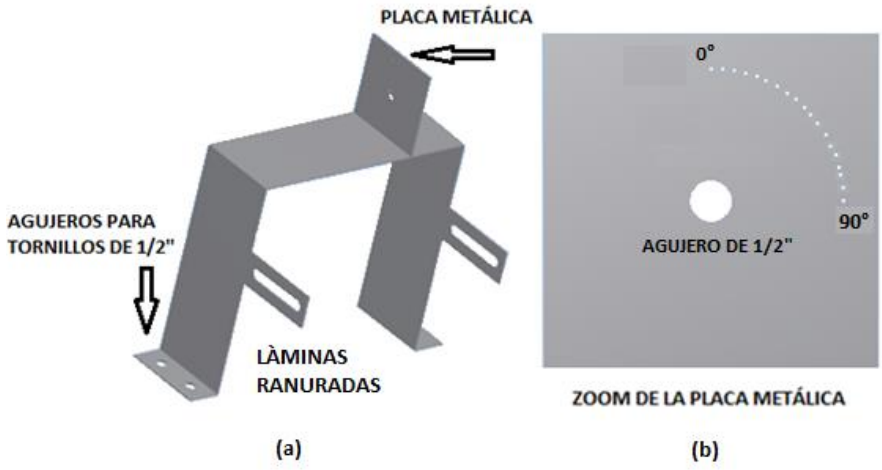
El porta-probetas se elaboró con base en los perfiles de acero estructural A36 disponibles del laboratorio de manufactura, con el fin de disminuir los costos de la construcción. El porta-probetas se compone de un soporte metálico, un porta-muestras, un posicionador, y un soporte para una pistola (encargada de expulsar el chorro de agua). A continuación se describen en detalle cada componente.

- Soporte metálico: está hecho en su gran mayoría con perfiles de acero estructural A36 y en su parte inferior tiene un soporte a cada lado con dos agujeros en los cuales entran tornillos de ½ pulgada, que se pueden apreciar en la Ilustración 18 (a). Los tornillos de ½ pulgada permiten la unión del soporte metálico con la parrilla de la cabina.

  Asimismo, el soporte tiene soldado en su parte superior la placa cuadrada mostrada en la Ilustración 18 (b), la cual sirve de soporte para el porta-muestras, que se describirá más adelante. La placa tiene un agujero en el centro de ½ pulgada y alrededor de éste se encuentra una circunferencia marcada por agujeros pequeños, que se encargan de variar el ángulo de impacto en la probeta. Los agujeros se mecanizaron en una fresadora, realizando un montaje similar al que se utiliza para la fabricación de los dientes de los piñones, con el fin de garantizar con precisión los 5° de variación entre cada agujero.

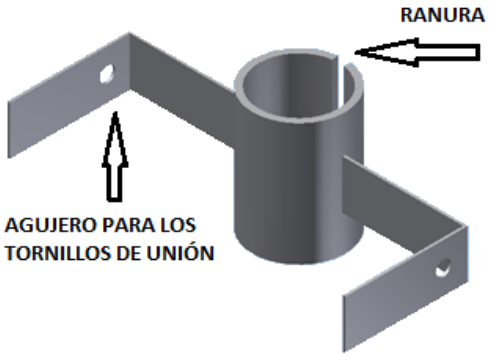
  El soporte metálico está compuesto también por dos tramos de láminas ranuradas en el medio, soldadas con soldadura tipo SMAW, como se observa en la Ilustración 18 (a), las cuales, se unen por medio de tornillos al soporte de la pistola que se describirá más adelante. La función de estas ranuras, es variar la distancia de impacto del chorro.

Ilustración 18. Soporte metálico. (a) soporte metálico completo (b) placa metálica.



- Soporte para la pistola: Este soporte mostrado en la Ilustración 19 está construido con láminas y tubería de acero estructural. Como se había mencionado anteriormente, este soporte va unido por medio de tornillos a las láminas ranuradas de la estructura metálica, lo cual permite que se pueda variar la distancia de impacto del chorro. En los ensayos, la pistola se ubicará dentro del tramo cilíndrico, el cual posee una ranura en su longitud para permitir el paso de las mangueras que se unen a la pistola de chorro de agua.

Ilustración 19. Soporte para la pistola de chorro de agua.



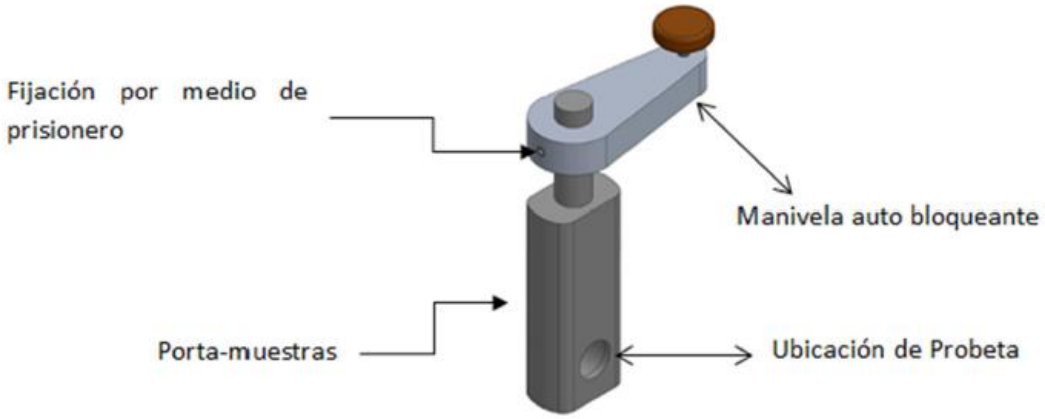
- Porta-muestras y posicionador: Este diseño se basó en el diseño realizado por Chávez [2] en el tribómetro de cilindro rotatorio. Los elementos que lo componen se pueden observar en la Ilustración 20, todos ellos; exceptuando la punta de bronce del pin posicionador, se fabricaron en empack N, debido a que es un material que presenta buena resistencia la corrosión y es de fácil mecanizado.

Ilustración 20. Componentes del sistema del porta-muestras y posicionador.



Como se puede observar en la Ilustración 21, unido al porta-muestras se encuentra la manivela auto bloqueante, que se encarga de posicionar el porta-muestras en diferentes ángulos.

Ilustración 21. Sistema porta-muestras y posicionador. **[2]**



Pistola de chorro de agua: El diseño de esta pistola se basó en el diseño de una pistola estándar utilizada para realizar *sand-blasting*, la cual se puede observar en la Ilustración 22.

Las pistolas de *sand-blasting*, funcionan con dos entradas; una de aire y otra de arena, la entrada de aire se conecta al compresor, mientras que la segunda entrada se conecta a un recipiente contenedor de arena. Cuando el aire del compresor entra a la pistola, se crea una

diferencia de presiones, que permite la succión de la arena la cual es expulsada por la boquilla de la pistola a alta velocidad.

Ilustración 22. Pistola de *Sand-blasting* del laboratorio de tribología.



En ensayos previos realizados con la pistola, se determinó de que esta podía expulsar *slurry* a altas velocidades, si se conectaba de manera similar a cuando se hace un proceso de *sand-blasting*, variando la conexión de arena seca a una mezcla homogénea de agua con partículas suspendidas.

Cabe anotar, que aunque en los ensayos la pistola lograba expulsar el *slurry*, su funcionamiento no era el adecuado, ya que se obstruía con mucha facilidad y no permitía un buen flujo de aire, por tanto, se decidió fabricar en el laboratorio de procesos de manufactura una pistola más eficiente para esta aplicación.
Para resolver el problema de obstrucción de la pistola, el cual no permitía el paso del flujo de aire, se optó por incrementar los diámetros de entrada y salida del aire en proporciones iguales, con el objetivo de no afectar la succión en la pistola.

En la Ilustración 23 se muestra en mayor detalle la boquilla de la pistola de *sand-blasting* estándar, la cual, se compone de dos elementos, uno de ellos -el que entra en contacto con el *slurry* a alta velocidad, está fabricado en un material cerámico con alta resistencia a la corrosión y erosión para reducir los efectos que se puedan provocar en el interior de la pieza por el paso del *slurry*, en su interior. Este elemento tiene un agujero pasante el cual presenta una reducción en su diámetro para aumentar la velocidad del fluido a la salida. El otro elemento está fabricado en aluminio y tiene como función proteger la pieza de material cerámico e incorporar por medio de una unión roscada la boquilla a la pistola.

Esta boquilla se incorporó a la nueva pistola fabricada, debido a que si presentó un funcionamiento adecuado en los ensayos.

Ilustración 23. Boquilla de la pistola de *Sand-blasting*.

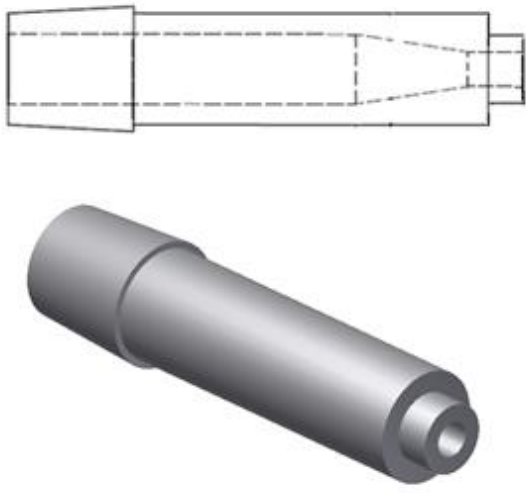


A continuación se muestran en la Ilustración 24, Ilustración 25 y la Ilustración 26 las piezas que componen la nueva pistola fabricada para el tribómetro.

La Ilustración 24 corresponde a la pieza que permite la entrada del aire en la pistola. Esta pieza está construida en acero SAE 1020 y tiene en uno de sus extremos una terminación cónica que facilita la conexión de la manguera de 3/8", proporcionando salida del aire almacenado en el tanque mostrado en la Ilustración 28 (a). En su extremo opuesto la pieza 1 se introduce por ajuste en la pieza 3 (Ilustración 26) por medio del agujero A mostrado en la Ilustración 26.

En su interior, la pieza 1 presenta un cambio de sección con forma cónica el cual tiene como objetivo aumentar la velocidad de entrada antes de que el aire entre en contacto con el *slurry*.

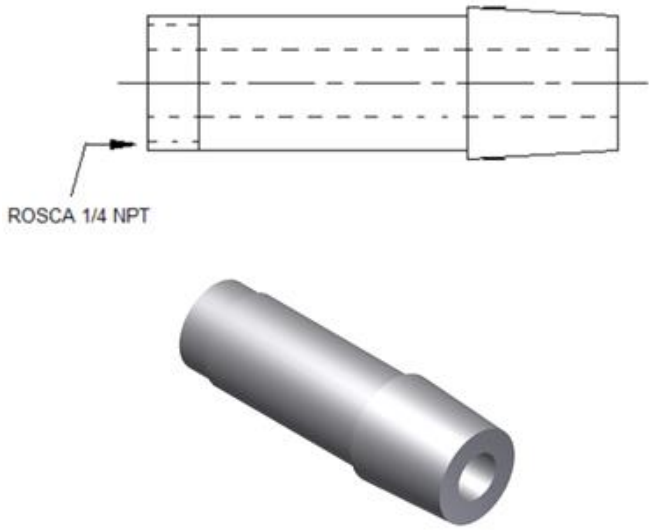
Ilustración 24. Pieza 1- entrada del aire.



La Ilustración 25 corresponde a la pieza de entrada del *slurry*. Este elemento, presenta en uno de sus extremos una conicidad que permite la conexión con la manguera de salida del *slurry* del tanque mostrada en la Ilustración 28 (a). En su extremo opuesto tiene una rosca de ¼ NPT, que permite la unión de esta pieza con la pieza de unión de los fluidos, mostrada en la Ilustración 26.

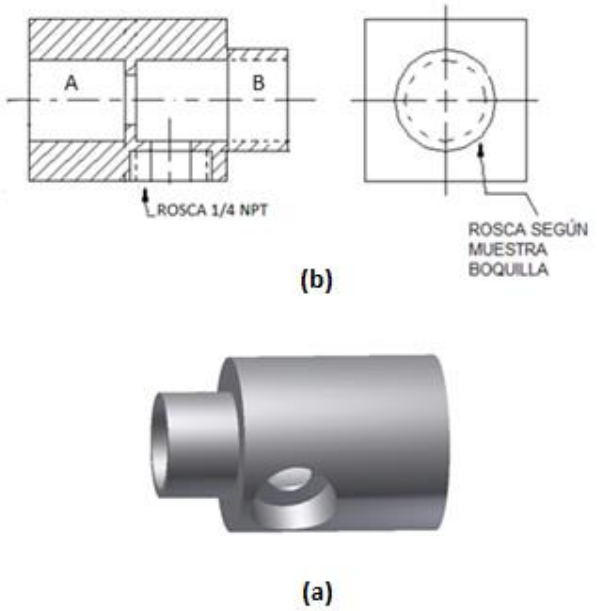
La pieza de entrada del *slurry* tiene como función recibir el *slurry* que viene del tanque e introducirlo en la pistola de chorro de agua. Esta pieza está construida en duraluminio, que es un material adecuado para su función, debido a que es un material liviano, fácil para mecanizar y resistente a la corrosión. Aunque, el duraluminio no sea un material muy resistente al desgaste erosivo; en comparación con el material cerámico con el cual se fabricó una de las piezas de la boquilla, se optó por utilizarlo, debido a que el *slurry* toma una velocidad elevada después de que entra en contacto con el aire. Esto ocurre después de que el *slurry* ha pasado por esta pieza, por tanto, ésta no se ve afectada directamente por este fenómeno.

Ilustración 25. Pieza 2- entrada del slurry.



En la Ilustración 26 (a) se muestra la pieza de unión de los fluidos; aire y *slurry*. Este elemento al igual que el anterior está construido en duraluminio y como se había mencionado anteriormente se une por medio de un ajuste y una rosca a las piezas de entrada de aire y de *slurry*. En el extremo B mostrado en la Ilustración 26 (b), tiene una rosca que le permite la unión con la boquilla de pistola de *sand-blasting* mostrada en la Ilustración 23.

Ilustración 26. Pieza 3- unión de los fluidos. (a) sólido de la pieza 3 (b) planos de la pieza 3.



En la Ilustración 27 se muestran en conjunto las piezas de la pistola fabricada.

Ilustración 27. Pistola del tribómetro.



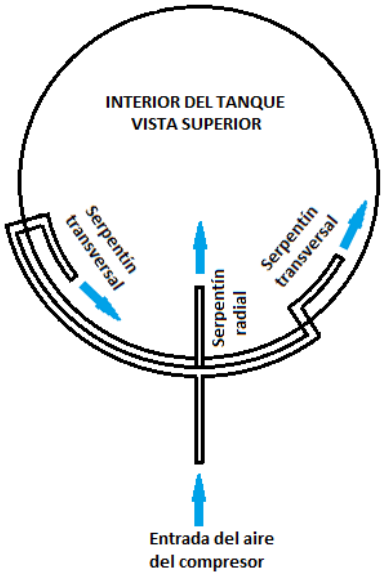
Tanque del *Slurry*: Este recipiente es el encargado del almacenamiento del *slurry* y su homogenización. Para reducir costos y tiempos de fabricación, se utilizó como tanque una pipa de gas propano de 40 lb, la cual tiene una geometría cilíndrica de 31 cm de diámetro y 60 cm de alto.

Ilustración 28. Tanque del Slurry. (a) vista frontal del tanque (b)agujero de descarga (c) conexión del aire a presión con los serpentines.



Este tanque tiene dos agujeros roscados con tapa, uno en la cara superior y otro en la inferior – ver Ilustración 28 (a) y (b), los cuales tienen como función la carga y descarga del *slurry* al inicio y al final de la prueba. Asimismo, en su base tiene unos serpentines en tubería de cobre de ¼ de pulgada (ver Ilustración 28 (c) e Ilustración 29), uno ubicado de manera radial y dos tangenciales a la circunferencia del tanque, los extremos de los serpentines se encuentran introducidos en el tanque. Estos serpentines se conectan a la manguera de salida del aire y su función principal es generar turbulencia en la mezcla para que esta se homogenice.

Ilustración 29. Esquema de la ubicación de los serpentines.



En la cara superior del tanque se encuentran dos tubos de cobre de 3/8 de diámetro, uno de ellos es la salida del *slurry* y el otro es la salida del aire; ambos flujos se conectan a las entradas de la pistola mostrada en la Ilustración 27.

Regulador de presión: Se utilizó un regulador de presión para aire comprimido marca NORGREN que se encuentra unido por medio de racores en bronce a un manómetro marca RITUER, cuyo rango está entre 0 y 160 psi.

La salida de aire del compresor se conecta al manómetro, el cual muestra la presión del aire del compresor. El aire comprimido es dirigido al regulador de presión, donde se puede establecer la presión que se desee para la entrada del aire en el tanque mostrada en la Ilustración 28 (a). En la Ilustración 30 se muestra el montaje del manómetro y el regulador de presión.

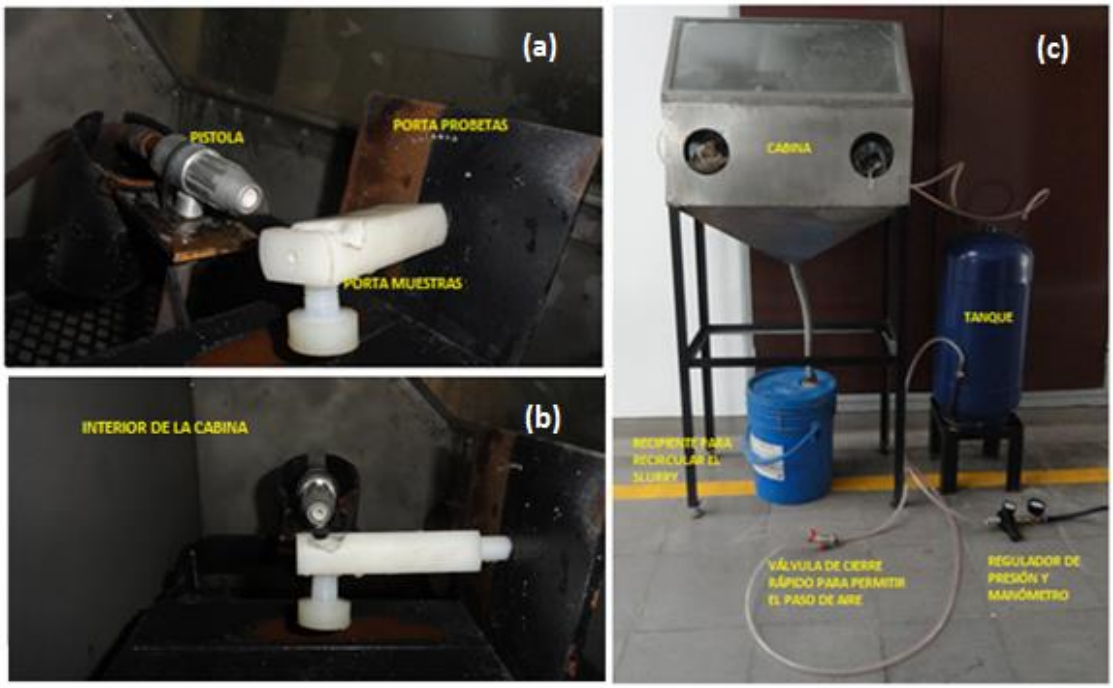
Ilustración 30. Regulador de presión.



Compresor: Para el ingreso del aire en el tanque, se utilizó un compresor marca Siemens con capacidad de manejar rangos de presión hasta los 120 psi. Este compresor se encuentra ubicado en el Laboratorio de Manufactura de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

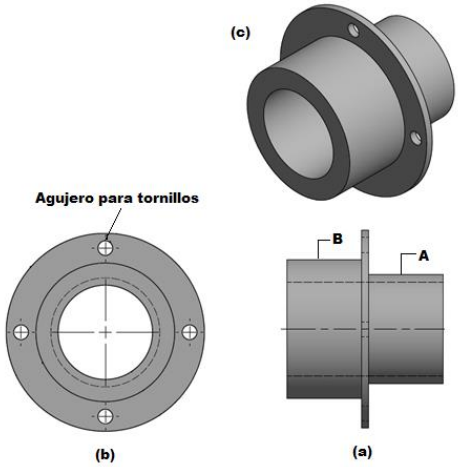
Finalmente, en la Ilustración 31 se muestran construidas las piezas descritas anteriormente. En la Ilustración 31 (a) y (b) se puede observar el interior de la cabina, donde se encuentra el porta probetas, el porta muestras y la pistola. En la Ilustración 31(c) se muestra la configuración externa del tribómetro, donde se encuentra la cabina, el tanque y el regulador de presión con el manómetro.

Ilustración 31. Tribómetro de chorro de agua construido. (a) pistola, porta-probetas y porta-muestras (b) interior de la cabina (c) tribómetro de chorro de agua, vista externa.



En las imágenes (a) y (b) de la Ilustración 31, se puede observar que el porta-muestras construido se vio afectado por el desgaste. Se propone como solución aumentar el diámetro del agujero donde se ubican las probetas de ½", para introducir en él la parte A de la pieza que se encuentra en la Ilustración 32(a) y fijar ambas piezas por medio de cuatro tornillos que se ubican en los agujeros mostrados en la Ilustración 32 (b).

Ilustración 32. Pieza propuesta para evitar el desgaste en el porta-muestras. (a) vista de frontal (b) vista lateral derecha (c) sólido de la pieza.



La pieza fijada se construirá en un material con alta resistencia al degaste y a la corrosión, se encargará de alejar la superficie de impacto de la probeta, evitando que el chorro entre en contacto directo con el porta-muestras, debido a que la probeta se ubica en el extremo B de la Ilustración 32 (a).

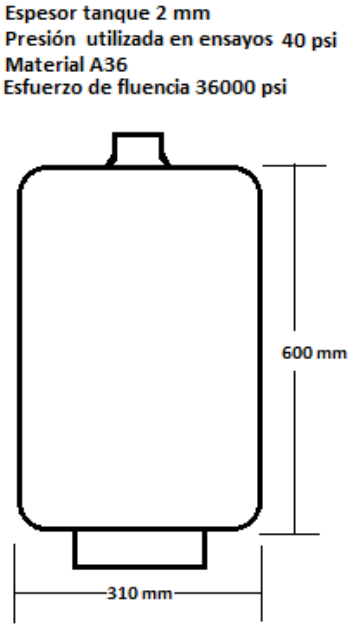
4.4 INGENIERÍA DE DETALLE

Terminado el proceso de la ingeniería básica, se procedió a realizar los cálculos de mayor relevancia para el diseño de este equipo.

4.4.1 Cálculo del espesor mínimo del tanque.

Para calcular el espesor mínimo del tanque se utilizó la teoría presentada en el numeral 3.1.6 de este documento. El tanque del tribómetro se consideró como un cilindro de pared delgada porque la relación D/t mostrada en la Ilustración 5 es mayor a 10 (ver Ilustración 33).

Ilustración 33. Especificaciones del tanque del tribómetro.



La Ecuación 15 se obtiene calculando los esfuerzos longitudinales σ_z, los esfuerzos de costilla σ_θ con la Ecuación 7, dejándolos expresados en términos del espesor t para luego reemplazarlos en la Ecuación 8, correspondiente al criterio de Von Mises.

Ecuación 15. Cálculo del espesor mínimo del tanque.

$$\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{Pr}{\sigma_y} < t$$

Donde P es la presión en el interior del tanque, r el radio, t el espesor y σ_y el esfuerzo de fluencia del material. Reemplazando los valores numéricos de la Ilustración 33 se obtiene que para una presión de trabajo de 40 psi, el espesor mínimo del tanque es de 0,15 mm.

Finalmente, si se calcula el σ_V con el espesor real del tanque (2 mm) y se reemplaza este valor en la Ecuación 9, se obtiene que el Factor de seguridad (F.S) es de 13,4.

4.4.2 Cálculo de la velocidad promedio de salida del chorro

Para el cálculo de la velocidad promedio de salida del chorro se utilizó la Ecuación 16, en la cual, la suma de los flujos másicos de entrada; aire y *slurry*, es el flujo másico total que se tiene a la salida.

Ecuación 16. Ecuación de flujos másicos.

$$\dot{m}_{total} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{slurry}$$

Donde:

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{aire} Q_{aire}$$

$$\dot{m}_{slurry} = \rho_{slurry} Q_{slurry}$$

$$\dot{m}_{total} = \rho_{aire+slurry}\, V_{promedio} A_{boquilla}$$

Siendo Q_{aire}, Q_{slurry} los caudales del aire y el *slurry*, y $\rho_{aire+slurry}$, $\rho_{aire,}$ ρ_{slurry} las densidades de la mezcla aire con *slurry*, el aire y el *slurry*, respectivamente. El símbolo $A_{boquilla}$ corresponde al área de salida de la boquilla y $V_{promedio}$ corresponde a la velocidad promedio de salida del chorro.

Para calcular el Q_{aire} (caudal de aire) se requería conocer la velocidad promedio de salida del aire, por tanto, se realizó el montaje mostrado en la Ilustración 34, en el cual, se conducía el flujo de salida de la boquilla (aire+slurry) por un tubo de pvc de tres metros de longitud, que era lo suficientemente largo para que en su extremo libre saliera solo aire, libre de partículas y agua. Este flujo de aire pasaba a través de las aspas de un velómetro (ver Ilustración 35) y las hacía girar, el giro de las aspas activaba un sensor que tenía como

función contar el número de giros realizados por las aspas en un determinado tiempo, para de esta forma hallar la velocidad del flujo de aire.

Ilustración 34. Montaje realizado para la medición de la velocidad de salida del aire.

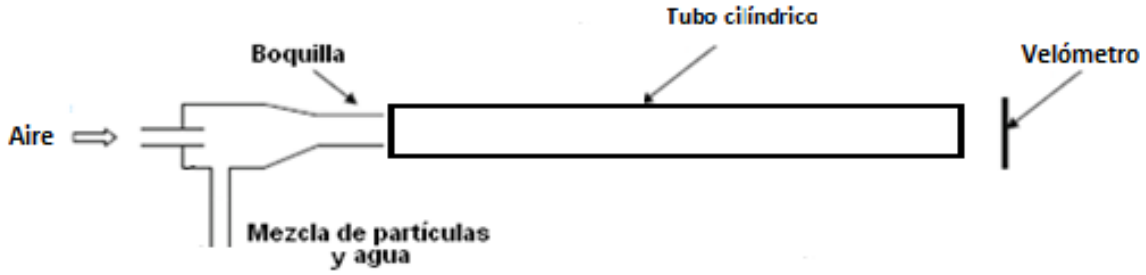


Ilustración 35. Velómetro.



Se realizaron mediciones de la velocidad de salida del aire a diferentes presiones y concentraciones. Se encontró que la velocidad de salida del aire variaba con la presión de entrada al tanque, pero no se presentaron variaciones significativas cuando se hacían cambios en la concentración del *slurry*. Los valores de la velocidad tomados con el velómetro a la salida del tubo se registraron en la Tabla 2.

El Q_{aire} se calculó utilizando la Ecuación 17, teniendo en cuenta que el diámetro del tubo de pvc utilizado era de 75,4 mm.

Ecuación 17. Cálculo de caudal.

$$Q = VA$$

Tabla 2. Mediciones de velocidad del flujo de aire a diferentes presiones y cálculo del caudal de aire.

AIRE		
Presión $[psi]$	Velocidad tubo $[m/s]$	Caudal aire $[m^3/s]$
10	0,32	0,0014
20	0,41	0,0018
30	0,48	0,0021
40	0,62	0,0028

Para calcular el Q_{slurry}, se realizaron aforos de la mezcla a diferentes presiones y concentraciones. Se encontró que el Q_{slurry} depende de la concentración, pero en mayor medida depende de la presión de entrada al tanque. En la Tabla 3 se registran los valores obtenidos en las mediciones y el cálculo del caudal de *slurry* para cada condición. La densidad del *slurry* se calculó como se indica en el numeral 3.1.3 de este documento.

Tabla 3. Mediciones y cálculos del caudal obtenidos en los aforos a diferentes presiones y concentraciones.

SLURRY								
Presión $[psi]$	Tiempo $[s]$	Masa agua $[Kg]$	Masa arena $[Kg]$	Masa total $[Kg]$	Concentración %	$\dot{m}$ slurry $[Kg/s]$	Densidad *slurry* $[Kg/m^3]$	Caudal *slurry* $[m^3/s]$
10	16,30	0,8807	0,0209	0,9016	2,3181	0,0553	1008,70	0,000055
20	16,00	1,2073	0,0721	1,2794	5,6355	0,0800	1021,45	0,000078
30	16,95	1,2985	0,0920	1,3905	6,6163	0,0820	1025,38	0,000080
40	20,01	1,8753	0,5717	2,4470	23,3633	0,1223	1095,74	0,000112
40	21,35	1,7930	0,9960	2,7890	35,7117	0,1306	1154,57	0,000113
40	20,03	2,0063	0,4217	2,4280	17,3682	0,1212	1069,38	0,000113

Finalmente, reemplazando en la Ecuación 16, sabiendo que la boquilla de salida de la pistola tiene un diámetro de 5,5 mm ($A_{boquilla} = 2{,}38 * 10^{-5} m^2$), se obtienen los valores de velocidad promedio para cada condición y se registran en la Tabla 4. Los valores de $\rho_{aire+slurry}$ se calcularon como se indica en el numeral 3.1.4 de este documento.

Tabla 4. Velocidades de salida a diferentes presiones y concentraciones.

Presión $[psi]$	Concentración %	Caudal salida $[m^3/s]$	Densidad slurry+aire $[Kg/m^3]$	Velocidad salida $[m/s]$
10	2,3181	0,001484	39,09	61,13
20	5,6355	0,001909	43,38	78,91
30	6,6163	0,002223	38,59	91,60
40	23,3633	0,002880	43,11	122,35
40	35,7117	0,002882	45,75	122,39
40	17,3682	0,002882	42,44	122,39

De la Tabla 4 se puede observar que la velocidad y concentración máxima reportada en las mediciones fue de 122,39 m/s y 35,7%, respectivamente. Ambas mediciones se obtuvieron con una presión de entrada del aire de 40 psi. Cabe anotar, que tanto la velocidad como la concentración obtenida están cercanas a los valores máximos reportados en los tribómetros de *slurry* erosión utilizados en investigaciones previas, nombrados en la Tabla 1.

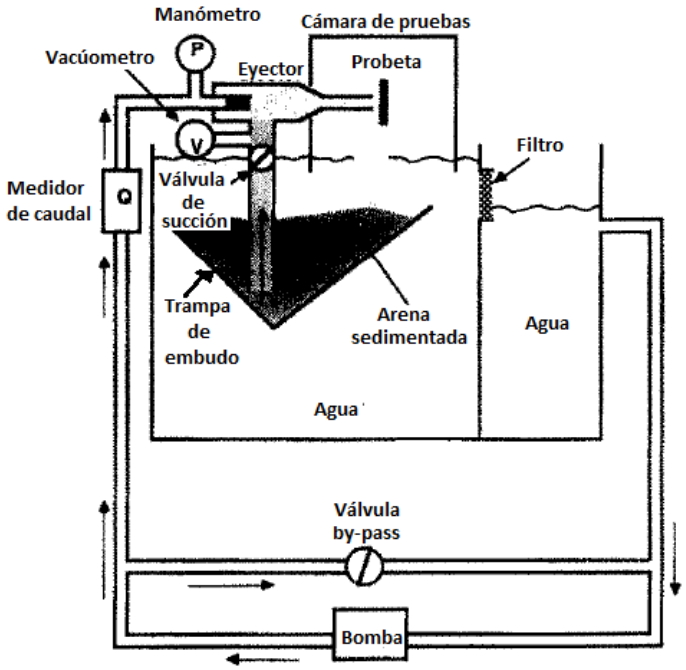
5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS PRUEBAS

Como primera medida, se efectuó una búsqueda de publicaciones en las cuales se hubieran hecho pruebas de desgaste erosivo en tribómetros tipo chorro de agua; donde se documentaran los parámetros de ensayo, el material de prueba y las partículas abrasivas utilizadas. Esto se hizo, con el fin de realizar los ensayos en el tribómetro construido bajo condiciones similares a las de la publicación, para luego comparar los resultados obtenidos con los encontrados en la literatura.

De los artículos consultados, se escogió como referencia *"Design of a Slurry Erosion Test Rig"* [20], debido que en este artículo presentan el diseño de un tribómetro de *slurry* erosión tipo chorro de agua y realizan pruebas de desgaste erosivo a diferentes ángulos de impacto, especificando los parámetros bajo los que se realizaron los ensayos. En la Ilustración 36 se muestra el esquema del tribómetro utilizado en éste artículo.

Ilustración 36. Esquema del tribómetro semi (RC) utilizado por Zu et al. **[20]**



Este tribómetro se caracteriza por ser semi (RC), ya que el *slurry* después de impactar la probeta cae en la trampa de embudo donde una parte de la arena del *slurry* se sedimenta, mientras que la restante se mezcla con el agua y pasa por un filtro, el cual tiene como objetivo liberar el agua de impurezas, para que luego ésta pueda ingresar a la bomba, la

cual se encarga de enviar el agua libre de impurezas nuevamente hacia una de las entradas del eyector. Asimismo, la arena que había quedado sedimentada en el embudo es enviada nuevamente al eyector por medio de la válvula de succión. El tribómetro se encuentra equipado con un medidor de caudal, un manómetro y un vacuómetro, que permiten controlar las variables de caudal y presión del proceso.

En el tribómetro anteriormente descrito se evaluó el desgaste erosivo a diferentes ángulos. Los parámetros de ensayo utilizados se encuentran en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros de ensayo utilizados en el artículo de Zu et al. **[20]**

PARAMETROS DE ENSAYO	
Material de prueba	Aluminio
Velocidad [m/s]	5,3
Ángulos evaluados [°]	15, 30, 50, 70, 90
Concentración [%]	17
Partículas	Sílice
Tamaño partículas [µm]	600-1000

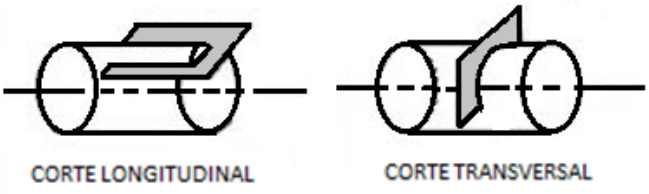
5.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL DE PRUEBA

Se adquirió el material de prueba (aluminio) en barras de ½ pulgada de diámetro que venían de un proceso de extrusión; se cortó transversalmente cada 10mm para formar las probetas y finalmente se caracterizó mediante metalografía y durezas.

5.2.1 Metalografía

Se tomaron dos muestras del material, una obtenida por un corte longitudinal y otra transversal como se observa en la Ilustración 37; se encapsula la muestra en una resina para poder sujetarla mejor. Luego, a esta muestra se le realizó un pulido inicial con las lijas 220, 320, 400, 600, 1000 y 1200, para después pulirlas con paño y partículas de alúmina de 1µm y 0,3 µm hasta obtener un acabado superficial tipo espejo (donde no se observen rayones).

Ilustración 37. Cortes realizados para la metalografía.



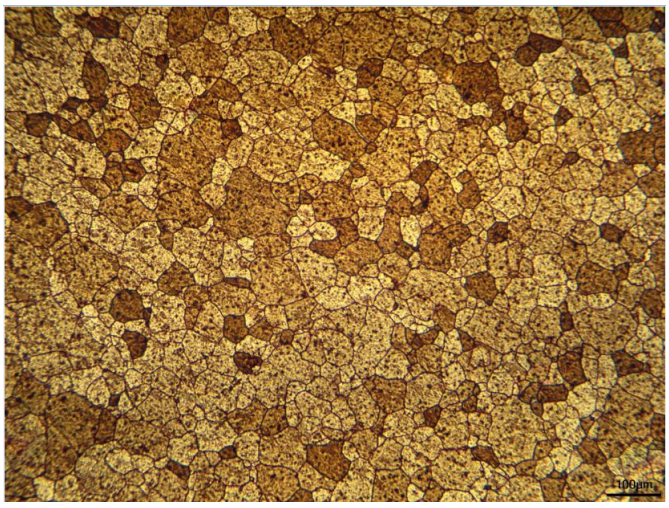
Posteriormente, se atacó la superficie para revelar la microestructura y poder observarla en el microscopio., el atacante utilizado fue el reactivo Kellers durante 20 segundos, seguido del reactivo de Weck durante 10 segundos.

En la Ilustración 38 se puede observar que el material es un aluminio que presenta una microestructura similar a algunos aluminios de la serie 5xxx y 6xxx, tal como se muestra en la Ilustración 40, e Ilustración 41.

En la Ilustración 41 se muestra un aluminio de 6063 el cual muestra una microestructura que se asemeja al material de prueba. En la Ilustración 40 se observa un aluminio 5657 al cual se le ha removido un recubrimiento de anodizado con 10% de H_3PO_4 a 80 °C.

En la Ilustración 39 se puede observar con mayor aumento la microestructura del material de prueba, donde se muestran granos de fase alfa, la cual en su interior tiene unos puntos negros que pueden ser precipitados, óxidos, inclusiones no metálicas o aluminuros de Magnesio.

Ilustración 38. Microestructura del material de prueba, corte transversal con aumento de 100x.



En la Ilustración 39 se muestra la microestructura obtenida en metalografía del corte longitudinal, esta se realizó con el objetivo de determinar si el material había sido tratado térmicamente después del proceso de extrusión. Se observa que los granos no se encuentran orientados, lo cual indica que el material si fue tratado térmicamente después del proceso de conformado.

El tratamiento térmico que generalmente se utiliza después de la extrusión de barras estructurales es el envejecido, este se realiza generalmente a los aluminios de la serie 2xxx, 6xxx y 7xxx. Este tratamiento térmico elimina la orientación de los granos y propicia la formación de precipitados duros y frágiles en una matriz blanda y dúctil. El precipitado obstaculiza el movimiento de dislocaciones, dando como resultado el endurecimiento de la aleación [33]. Este endurecimiento está en función del tamaño, la forma, la cantidad y distribución de los precipitados.

Por tanto, se determina que el material es una aleación de aluminio de la serie 6xxx, debido a que ha sido tratada térmicamente por envejecimiento.

Ilustración 39. Microestructura del material de prueba, corte longitudinal con aumento de 250x.

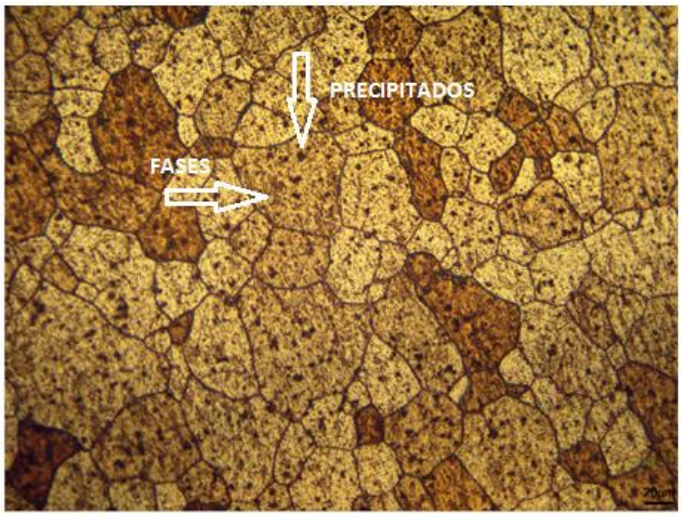


Ilustración 40. Microestructura de un Aluminio de la serie 5xxx, con aumento de 200x. (a) lingote, (b) láminas. **[34]**

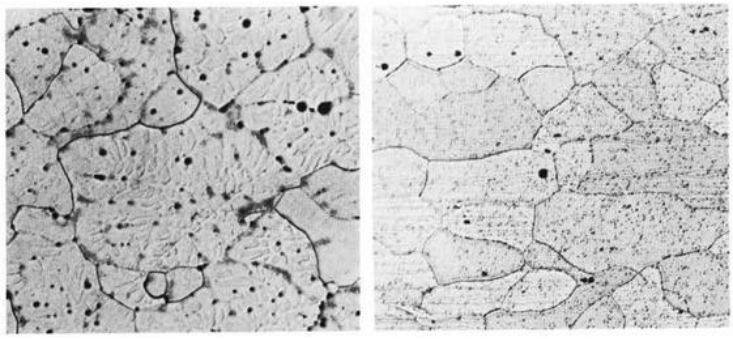
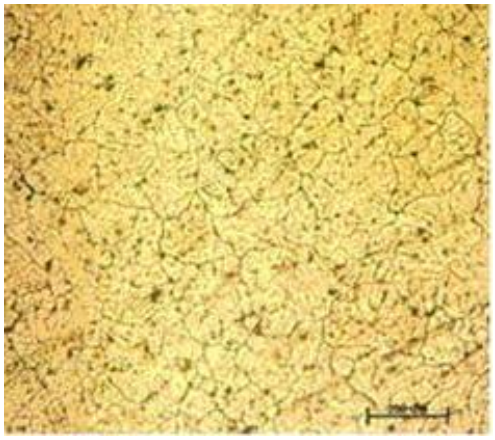


Ilustración 41. Microestructura de un Aluminio de la serie 6xxx. **[35]**



5.2.2 Medición de dureza

Las mediciones de dureza del material de prueba se obtuvieron por medio del durómetro Brinell del laboratorio de Análisis de Falla de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Para la toma de mediciones se utilizó un diámetro de indentador de 2,5mm con una fuerza de 62,5 kgf .El tiempo de sostenimiento de la carga fue de 30 segundos, dado que el aluminio es un material no ferroso. En total, se tomaron cinco mediciones sobre la superficie del material, teniendo en cuenta que la distancia entre cada medición no fuera menor a dos veces el diámetro de indentación.

La dureza promedio obtenida fue de 64,3 HB con un intervalo de confianza de 2,96 calculado con una distribución t al 95 %. Este valor de dureza es cercano al del aluminio 6063-T5 o al 6463-T5, que corresponde a los aluminios 6063 y 6463, con un tratamiento térmico de envejecimiento artificial, el cual reporta una dureza de 60 HB.

5.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS PARTÍCULAS ABRASIVAS

Para dar cumplimiento a los parámetros propuestos en los ensayos, se realizó una granulometría donde se escogieron los tamaños de grano que estaban dentro del rango establecido de 600-1000 micras, los cuales se encuentran en los tamices número 20, 25 y 30 de la Tabla 6. Posterior a esto se tomó una muestra de las partículas y se observó en el microscópico para analizar su morfología.

Se optó por utilizar en las pruebas arena tipo cuarzo en vez de sílice, debido a que ésta última presentaba una mayor cantidad de contenido de arcilla, lo cual dificultaba el proceso de caracterización granulométrica y lo hacía más nocivo. Además, ambas partículas tienen durezas similares, entre 750 y 1200 HV. [9]

5.3.1 Granulometría

La granulometría se llevó a cabo en la tamizadora del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad del Valle, con los tamices registrados en la Tabla 6. De la
Ilustración 43 podemos observar que la mayor cantidad de partículas se encuentran entre los tamices 25 y 30.

En la Ilustración 42 se puede apreciar el montaje realizado, el cual se realizó ubicando los tamices de mayor a menor según el tamaño de la abertura de su malla; esto con el objetivo de que al colocar una cantidad de arena en la parte superior del montaje y exponiéndola a 15 minutos de zarandeo en la tamizadora, la arena se distribuya en los diferentes tamices.

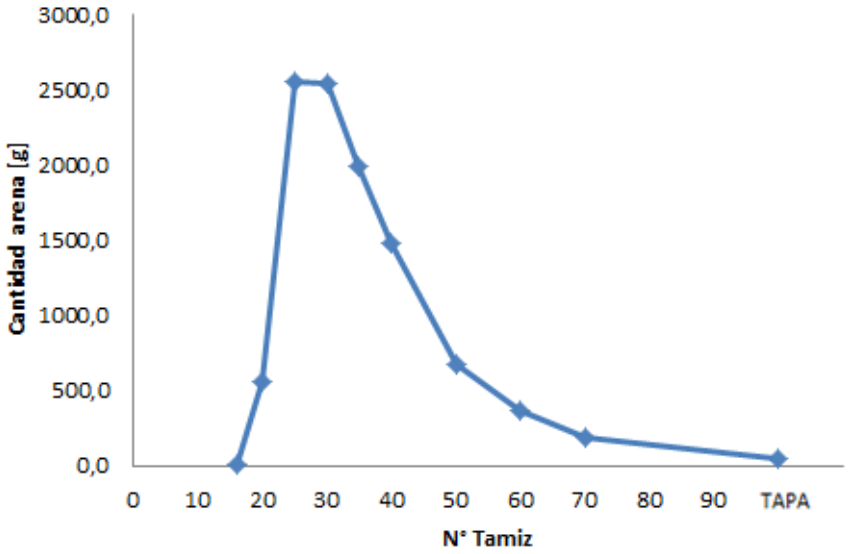
Ilustración 42. Tamizadora del laboratorio de Mecánica de Fluidos.



Tabla 6. Tamizado de la arena antes de los ensayos.

No Tamiz	Abertura [mm]	Cantidad arena [g]
16	1,180	15,4
20	0,850	557,2
25	0,710	2561,1
30	0,600	2541,9
35	0,500	1998,9
40	0,425	1483,7
50	0,300	675,9
60	0,280	370,4
70	0,212	192,0
100	0,150	53,2
TAPA	> 0,150	39,9
CANTIDAD TOTAL ARENA		10489,6

Ilustración 43. Granulometría de la arena antes de los ensayos.



5.3.2 Morfología

La morfología de la arena se puede realizar por inspección visual en un estereoscopio óptico, donde observando la forma de los granos de una muestra de arena, se determina si ésta es aguda o redonda. También, se puede calcular el factor de forma de la muestra de arena, determinando el perímetro y el área de cada grano y utilizando la Ecuación 2. Para este caso en particular se realizaron ambos métodos. De la Ilustración 44 se encontró que los granos de la arena utilizada presentaban una forma aproximadamente redonda.

Ilustración 44. Arena cuarzo utilizada en las pruebas, aumento de 20x.



Para calcular el factor de forma, se utilizó el programa ImageJ [36], el cual, teniendo una escala de referencia y señalando el contorno de grano, mide el perímetro y el área de dicha partícula. Se tomó el número de mediciones necesarias para que el error de la medición fuera menor al 5%. Los resultados obtenidos se registraron en la Tabla 7.

Tabla 7. Factor de forma de la arena de prueba.

FACTOR DE FORMA PROMEDIO	0,866
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,042
INTERVALO DE CONFIANZA 95%	0,021
% ERROR	0,025

Se determinó que el factor de forma promedio de la arena utilizada es 0,866 lo que indica que la morfología de las partículas de arena tipo cuarzo tienden a ser redondas.

5.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE LAS PRUEBAS

En este subcapítulo se describen las pautas requeridas para la realización de las pruebas en ambos tribómetros, teniendo en cuenta los parámetros de velocidad, concentración y ángulos de ataque establecidos inicialmente.

5.4.1 Probetas

La geometría de las probetas utilizadas en el tribómetro de chorro de agua y en el de cilindro rotatorio es la misma; es cilíndrica de ½ pulgada de diámetro y aproximadamente 10 mm de ancho, según la norma ASTM G119. [37]

Para el pulido inicial de las probetas se utilizaron las lijas 150, 220, 320, 400, 600, 1000 y 1200. Seguido de esto, se dio un pulido final con paño y partículas de alúmina de 1µm y 0,3 µm hasta obtener un acabado tipo espejo; la cara que se pulía era la superficie que iba a ser impactada por las partículas del *slurry*.

Después de pulida, la probeta era sometida a un proceso de ultrasonido en el cual se liberaba de impurezas, para después ser pesada en la balanza del Laboratorio de Química de la Universidad del Valle, que tenía una resolución de 0,000001 g. Habiendo seguido los pasos anteriores, la probeta estaba lista para un ensayo.

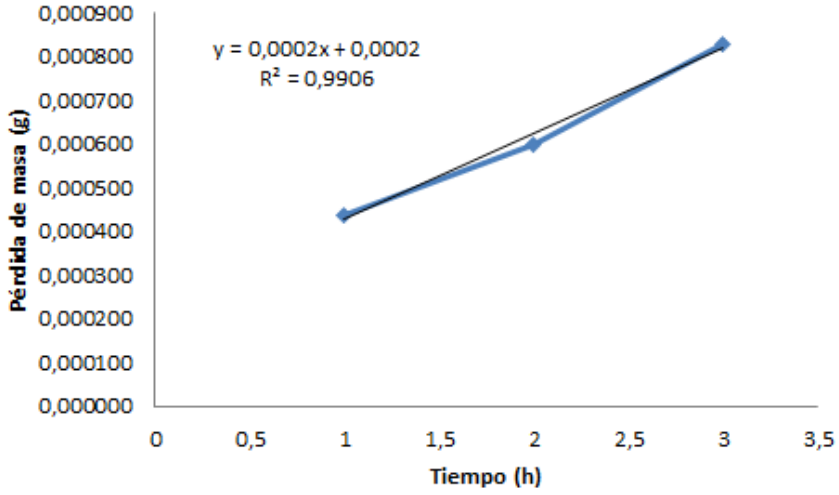
5.4.2 Ensayos

5.4.2.1 Ensayos en el tribómetro de cilindro rotatorio

Para dar inicio al ensayo, se realizó el montaje de la probeta en el tribómetro y se impactó por el *slurry* durante una hora. Luego, se detuvo el proceso y se retiró la probeta para realizar ultrasonido con el fin de liberarla de impurezas, después se pesó en la balanza para cuantificar la pérdida de masa ocasionada por los impactos a los cuales había sido sometida.

Este procedimiento se repitió en cada probeta hasta que la línea de tendencia de la curva de la gráfica de pérdida de masa en función del tiempo presentara un coeficiente de correlación (R^2) superior a 0,95, para garantizar que los ensayos se realicen en la región estable. Esto en general, se logró después de tres a cuatro horas de ensayo, como se pude observar en la Ilustración 45.

Ilustración 45. Gráfica de pérdida de masa en función del tiempo de una réplica realizada en el tribómetro de cilindro rotatorio.



En este equipo se realizaron tres replicas por cada ángulo de impacto evaluado; estos ángulos fueron 15°, 30°, 45° y 90°.

La velocidad v_θ a la que se debían realizar los ensayos era 5,3 m/s, para calcular el número de rpm a las que tenía que girar el motor para presentar dicha velocidad de impacto en la probeta, se aplicó la teoría mencionada en el numeral 3.1.6 de este documento. Cabe anotar, que en el tribómetro de disco rotatorio ocurre lo contrario puesto que el cilindro interior es el que se encuentra en movimiento con una velocidad angular Ω_θ , mientras que el cilindro exterior es estacionario, por tanto, se resuelve la
Ecuación **13** con las siguientes condiciones de borde:

$$v_\theta(r = R) = 0 \; ; \; v_\theta(r = kR) = \Omega_\theta kR$$

Siendo R y kR el radio del cilindro externo e interno, respectivamente.

Finalmente, se obtiene:

Ecuación 18. Ecuación para el cálculo de velocidades en el tribómetro de cilindro rotatorio.

$$v_\theta(r) = \Omega_\theta R \frac{\left(\frac{kR}{r} - \frac{kr}{R}\right)}{\left(\frac{1}{k} - k\right)}$$

Teniendo las medidas de la geometría del tribómetro; r =0,11m, R=0,15m, kR = 0,068m, y la Ecuación 18, se calcula que se requieren 2108 rpm para lograr una velocidad tangencial de 5,3 m/s.

Ecuación 19. Cálculo de la relación de la velocidad angular con la frecuencia. **[2]**

$$RPM = \frac{120 * f}{P}$$

En la Ecuación 19, siendo f la frecuencia y P el número de polos; $P = 2$, al reemplazar los valores numéricos se encuentra que para lograr una velocidad angular de 2108 rpm, se debe programar una frecuencia de 35,1 Hz en el variador de velocidades del tribómetro.

Finalmente, se realizaron ensayos con esta velocidad durante seis horas a un ángulo de 15° en el material de prueba y no se reportaron pérdidas de masa significativas, por tanto, se optó por hacer aumentos en la frecuencia, debido a que si no se hacía esto, se requerirían más de seis horas por cada replica, lo cual demandaba mucho tiempo. Finalmente, la frecuencia que se seleccionó para los ensayos fue de 55,4 Hz, que equivalen a 8,4 m/s. En la Tabla 8 se encuentran los parámetros utilizados en las pruebas realizadas en el tribómetro de cilindro rotatorio.

Tabla 8. Parámetros de ensayo en el tribómetro de cilindro rotatorio.

PARÁMETROS DE ENSAYO	
Material de prueba	Aluminio
Velocidad [m/s]	8,4
Ángulos evaluados [°]	15, 30, 45, 90
Concentración [%]	17
Partículas	Cuarzo
Tamaño partículas [µm]	600-850

5.4.2.2 Ensayos en el tribómetro de chorro de agua

Para dar inicio al ensayo, se realizó el montaje de la probeta en el tribómetro y se impactó por el *slurry* durante cuatro minutos. Luego, se detuvo el proceso y se retiró la probeta para realizarle ultrasonido con el fin de liberarla de impurezas, después se pesó en la balanza para cuantificar la pérdida de masa ocasionada por los impactos a los cuales había sido sometida.

A diferencia de los ensayos del tribómetro de cilindro rotatorio, el desgaste producido en este tribómetro fue muy superior, quedando en el periodo estable. En este equipo, por cada réplica se necesitaban sólo 4 minutos de ensayo. En su totalidad, se realizaron tres replicas por cada ángulo de impacto evaluado; estos ángulos fueron 15°, 30°, 45°, 60° y 90°. Estas pruebas se realizaron con los parámetros registrados en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de ensayo en el tribómetro tipo chorro de agua.

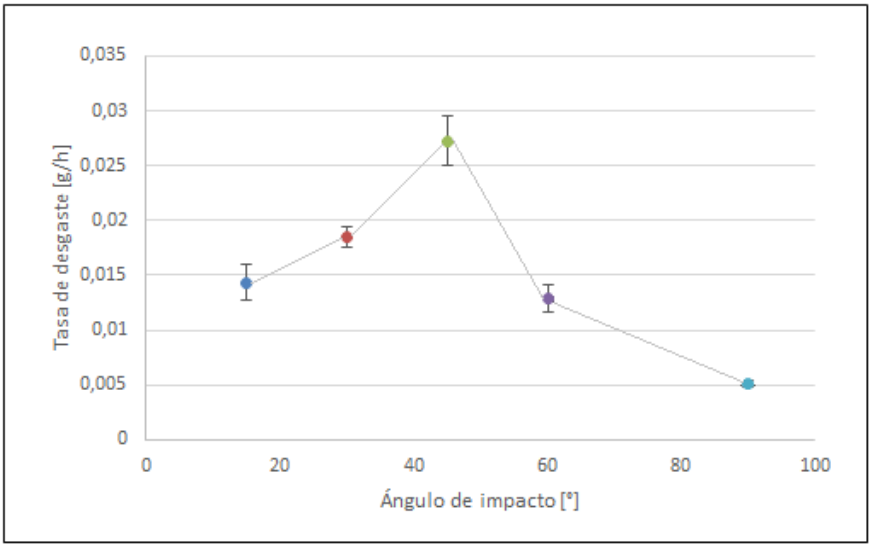
PARAMETROS DE ENSAYO	
Material de prueba	Aluminio
Velocidad [m/s]	122,39
Ángulos evaluados [°]	15, 30, 45, 60, 90
Concentración [%]	17,37
Partículas	Cuarzo
Tamaño partículas [µm]	600-850

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 GRÁFICA DE LA TASA DE DESGASTE CON RESPECTO AL ÁNGULO DEL TRIBÓMETRO DE CHORRO DE AGUA

En la Ilustración 46 se observa la gráfica de las pruebas de desgaste erosivo para los ángulos de 15°, 30° 45°, 60° y 90°, realizadas en el tribómetro tipo chorro de agua. Se evidencia que la línea de tendencia presenta un comportamiento creciente, desde los 15° hasta el ángulo crítico de 45°. Después de alcanzado el ángulo crítico, la línea de tendencia presenta un comportamiento decreciente hasta llegar al ángulo de 90°, donde se evidencia la menor tasa de desgaste.

Ilustración 46. Gráfica de tasa de desgaste en función del ángulo de impacto para el tribómetro tipo chorro de agua.



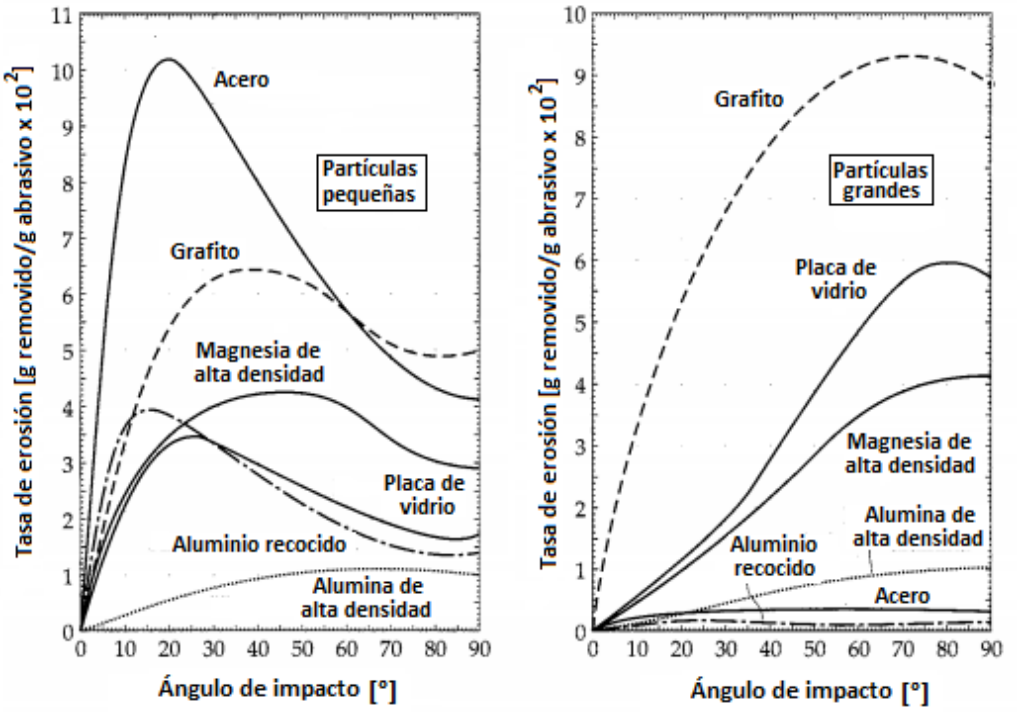
Las razones por la cual se obtuvo mayores tasas de desgaste por fuera del rango esperado para materiales dúctiles; entre 15° y 30° (ver Ilustración 3), puede estar relacionada con la forma esférica de las partículas de cuarzo utilizadas en los ensayos. Se ha encontrado en la literatura que la mayoría de materiales metálicos erosionados con partículas de forma angulosa presentan un comportamiento dúctil, pero que cuando estos materiales se erosionan con partículas esféricas pueden tender a comportarse como un material frágil [9].

También, el tamaño de las partículas de cuarzo utilizadas; entre 600 µm a 850 µm, es otro factor determinante en el comportamiento del desgaste, como se puede observar en la Ilustración 47, donde se realizaron ensayos de desgaste erosivo a diferentes ángulos, utilizando como materiales de impacto el vidrio, acero, grafito y algunos cerámicos, los

cuales revelaron un cambio de dúctil a frágil cuando se incrementaron los tamaños de las partículas de 8,75 µm a 127 µm. Como resultado se obtuvo un desplazamiento del valor máximo de desgaste obtenido a 30°, hacia ángulos cercanos a 80°. En ambos ensayos mostrados en la Ilustración 47 se utilizaron como abrasivos partículas de carburo de silicio a una velocidad de impacto de 152 m/s.

Además, otro factor de influencia puede ser la alta velocidad de impacto utilizada en los ensayos, ya que se encuentra en la literatura que, si esta se reduce se puede asegurar que la superficie se afecte en su mayoría por deformación plástica [9]; esto quiere decir, que se obtenga un comportamiento dúctil frente al desgaste por parte del material.

Ilustración 47. Efecto del tamaño de partícula en el desgaste erosivo. **[38]**



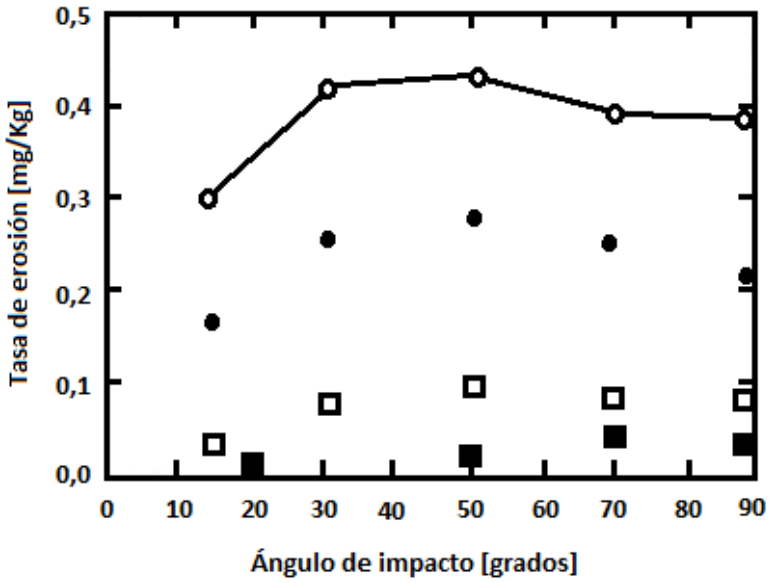
6.2 COMPARACIÓN DEL TRIBÓMETRO CON OTROS TRABAJOS

Para evaluar el funcionamiento del tribómetro de *slurry* erosión construido se compararon los resultados obtenidos en los ensayos de desgaste erosivo a diferentes ángulos de impacto –ver Ilustración 46, con los resultados de los ensayos realizados en el artículo de Zu et al [20], mostrados en la Ilustración 48.

Un factor importante a tener en cuenta, es que en el artículo de Zu et al [20] no mencionan el número de réplicas realizadas por cada ángulo evaluado y tampoco agregan barras de error en la gráfica, lo cual impide saber qué tan dispersos fueron sus resultados. Además, no se especifican en detalle los materiales de impacto utilizados, ya que por ejemplo, en el caso del Aluminio, este podría pertenecer a cualquiera de las series; desde la 1xxx hasta la 9xxx, o podría haber sido tratado térmicamente, estos aspectos son importantes definirlos pues de ellos dependen las propiedades mecánicas del material y con ello su comportamiento frente al desgaste erosivo.

Los ensayos se realizaron bajos los mismos parámetros, exceptuando el de la velocidad de impacto y el del tipo de partícula, debido a que las pruebas realizadas en el artículo se llevaron a cabo con arena sílice y a una velocidad de impacto más baja (5,3 m/s). Como los ensayos no se elaboraron bajo los mismos parámetros, en las comparaciones que a continuación se establecerán no se tendrán en cuenta las magnitudes de las tasas de desgaste, sino sólo con los comportamientos (creciente o decreciente), de las líneas de tendencia de las gráficas.

Ilustración 48. Gráfica de tasa de erosión en función del ángulo de impacto para Aluminio (o), cobre (●), acero dulce (□) y alúmina (■), erosionados por *slurry* de arena sílice entre 600-1000 µm con una concentración del 17% a una velocidad de 5,3 m/s. **[20]**



Al comparar las gráficas de la Ilustración 48 y la Ilustración 46, se observa que ambas líneas de tendencia presentan un comportamiento creciente entre los 15° y los 45° y, un comportamiento decreciente entre los ángulos de 50°.y 90°. También, en la Ilustración 46 se observa que el ángulo de impacto crítico obtenido en los ensayos del tribómetro construido se encuentra dentro del rango de ángulos de mayor desgaste mostrados en la Ilustración 48.

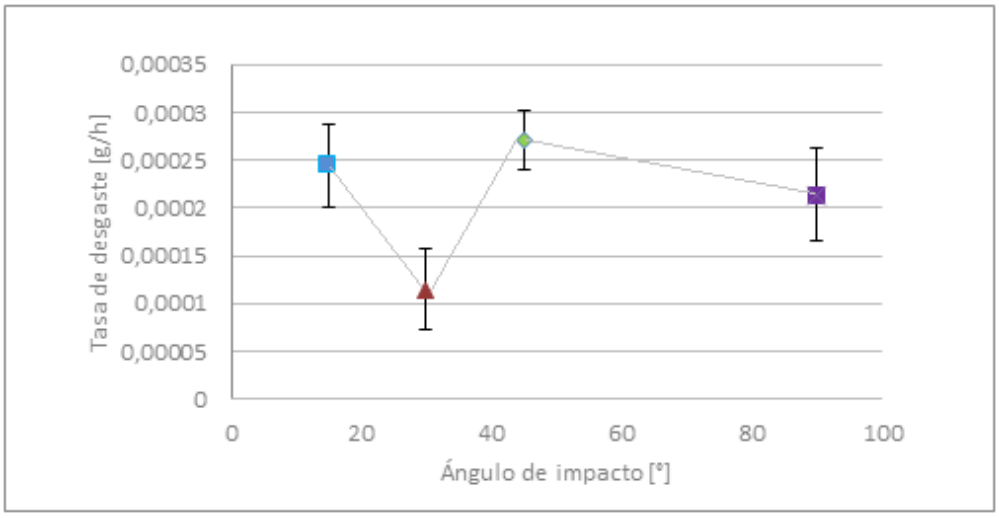
Cabe anotar, que la línea de tendencia de la Ilustración 48 muestra un comportamiento creciente entre los 30° y los 50°, al parecer de menor pendiente que el de la Ilustración 46. Esto se puede explicar debido a que en la Ilustración 46 se realizaron mediciones a la tasa de desgaste en los ángulos de 30°, 45° y 60°, mientras que en la Ilustración 48 estas mediciones se realizaron a los ángulos de 30°, 50° y 70°. Por tanto, en la Ilustración 48 no se tiene certeza de cuál sería el comportamiento de la tasa de desgaste en el ángulo de 45°, puede que en este ángulo al igual que en la Ilustración 46 haya un crecimiento súbito de la tasa de desgaste.

Finalmente, se determina que los resultados de los ensayos realizados en el tribómetro construido coinciden con los resultados de los ensayos del artículo de Zu et al [20], debido a que ambas líneas de tendencia presentan comportamientos similares. Además, en ambos ensayos el ángulo crítico se encuentra entre 30° y 50°, y el ángulo con menor tasa de desgaste es 90°.

6.3 GRÁFICA DE LA TASA DE DESGASTE CON RESPECTO AL ÁNGULO DEL TRIBÓMETRO DE CILINDRO ROTATORIO

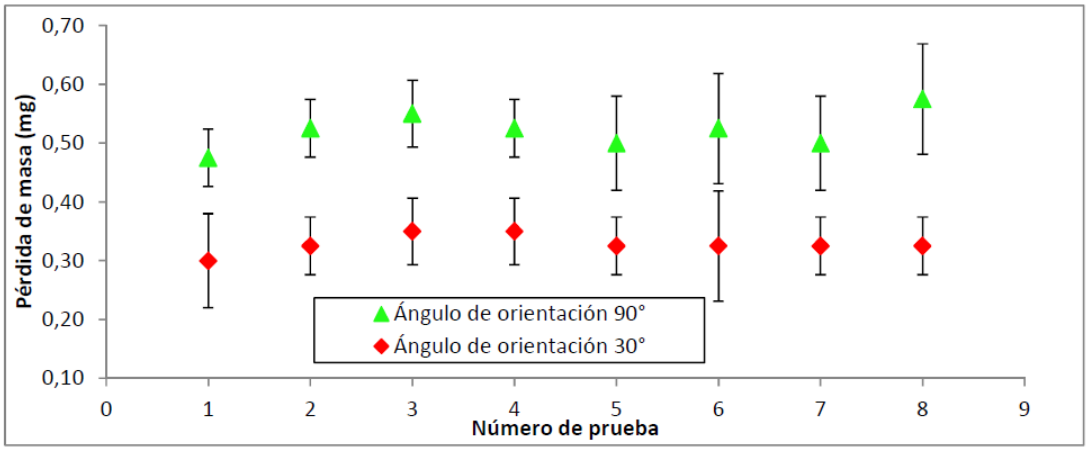
En la Ilustración 49 se muestra la gráfica obtenida de las pruebas de desgaste erosivo para los ángulos de 15°, 30° 45° y 90°, realizadas en el tribómetro de cilindro rotatorio. Se observa que la línea de tendencia presenta un comportamiento decreciente entre los 15° y 30°, en el cual se evidencia la menor tasa de desgaste; posteriormente vuelve a mostrarse creciente hasta llegar a los 45°, donde se presenta la mayor tasa de desgaste y finalmente vuelve a mostrarse decreciente hasta 90°.

Ilustración 49. Gráfica de tasa de desgaste en función del ángulo de impacto para el tribómetro de cilindro rotatorio.



El comportamiento que tuvo la línea de tendencia no corresponde a lo esperado, según lo encontrado en la literatura para materiales dúctiles (ver Ilustración 3). Cabe anotar, que en los ensayos realizados por Chávez [2] en este tribómetro, tampoco se obtuvieron resultados acordes con los de literatura, como se observa en la Ilustración 50 que se reportó una mayor pérdida de masa a 90°que a 30°. Estos ensayos se realizaron a un acero AISI 1020, impactado por una mezcla de *slurry* con concentración del 10% de partículas de arena comercial no normalizada entre 250 µm y 300 µm. La velocidad del rotor se fijó a 3000 rpm, que equivalen a una velocidad del impacto de 7,5 m/s.

Ilustración 50. Pérdida de masa a 30° y 90°, reportada en los ensayos realizados por Chávez. **[2]**



Lo anteriormente mencionado, da para pensar que tal vez la configuración de los tribómetros de cilindro rotatorio no son las más adecuadas para realizar este tipo de ensayos. Además, si se observan las barras de error de las gráficas obtenidas en los ensayos realizados en este equipo se puede notar que la dispersión en los datos es alta.

6.4 COMPARACIÓN ENTRE LOS TRIBÓMETROS USADOS EN LA INVESTIGACIÓN

En este numeral se realiza un análisis comparativo de la dispersión de los datos y las líneas de tendencia de las gráficas de tasa de desgaste en función del ángulo de ambos tribómetros. Cabe anotar, que los ensayos en ambos equipos se realizaron bajo los mismos parámetros exceptuando la velocidad de impacto de las partículas. Por tanto, en las comparaciones que a continuación se establecerán no se tendrán en cuenta las magnitudes de las tasas de desgaste, sino los comportamientos (creciente o decreciente), de las líneas de tendencia de las gráficas.

Al comparar las líneas de tendencia de la Ilustración 46 y la Ilustración 49, se observa que mientras la línea obtenida en el tribómetro tipo chorro de agua presenta un comportamiento creciente entre los 15° y 30°, la línea del tribómetro de cilindro rotatorio decrece, posteriormente ambas presentan un comportamiento creciente entre los 30° y 45°, y luego uno decreciente hasta 90°. Además, de que las líneas de tendencia no presentan un comportamiento similar, también difieren en los ángulos donde se presenta la menor tasa de desgaste, ya que para la gráfica del tribómetro de chorro de agua éste se presenta a los 90°, mientras que para el tribómetro de cilindro rotatorio a los 30°.

Al comparar la dispersión de los datos, se encuentra que en el tribómetro tipo chorro de agua se presenta una dispersión menor, como se puede observar en la Ilustración 51 donde se muestra que para obtener errores menores al 5% se deben realizar entre tres y seis réplicas dependiendo del ángulo evaluado; mientras que en el tribómetro de cilindro rotatorio se requieren entre seis y treinta y dos réplicas dependiendo del ángulo evaluado, como se observa en la Ilustración 52. Cabe anotar, que los ensayos en el tribómetro tipo chorro de agua son menos dispendiosos, puesto que demoran 4 minutos, mientras que en el tribómetro de cilindro rotatorio requieren un mínimo de 3 o 4 horas por cada réplica.

En la Tabla 10 y

Tabla 11 se pueden observar los errores obtenidos en los ensayos realizados en el tribómetro tipo chorro de agua y en el de cilindro rotatorio, respectivamente. Se encuentra que los errores en los ensayos del tribómetro tipo chorro de agua fueron menores.

Tabla 10. Desviación estándar, intervalos de confianza y errores de cada ángulo evaluado en el tribómetro tipo chorro de agua.

Angulo de impacto [°]	15	30	45	60	90
Desviación estándar	0,000650	0,000369	0,000887	0,000483	0,000123
Intervalo de confianza 95%	0,001620	0,000917	0,002204	0,001199	0,000305
Error [%]	11	5	8	9	6

Tabla 11. Desviación estándar, intervalos de confianza y errores de cada ángulo evaluado en el tribómetro de cilindro rotatorio.

Angulo de impacto [°]	15	30	45	90
Desviación estándar	0,000018	0,000017	0,000012	0,000019
Intervalo de confianza 95%	0,000044	0,000042	0,000030	0,000048
Error [%]	18	37	11	22

Ilustración 51. Dispersión de los resultados en el tribómetro tipo chorro de agua para 15° (◆), 30° (■), 45° (▲), 60° (×) y 90° (✳).

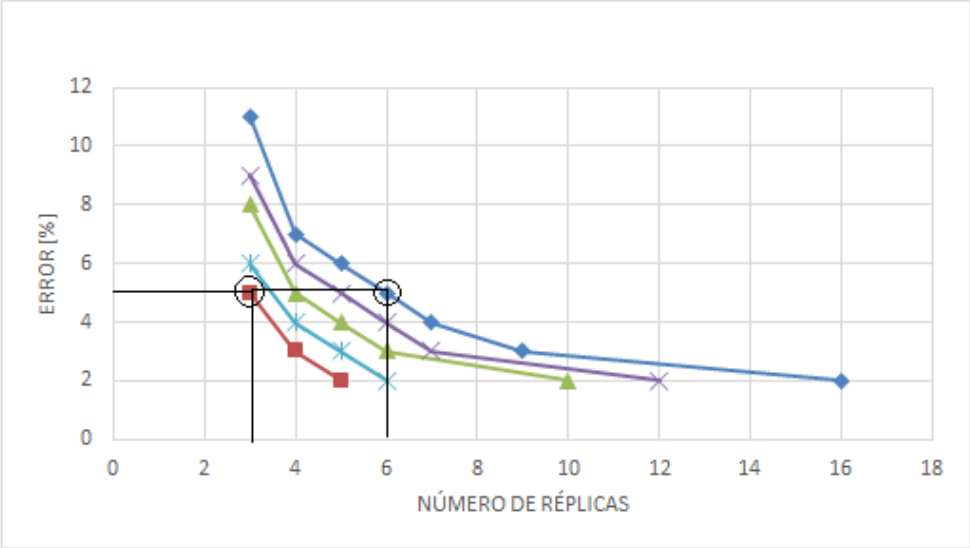
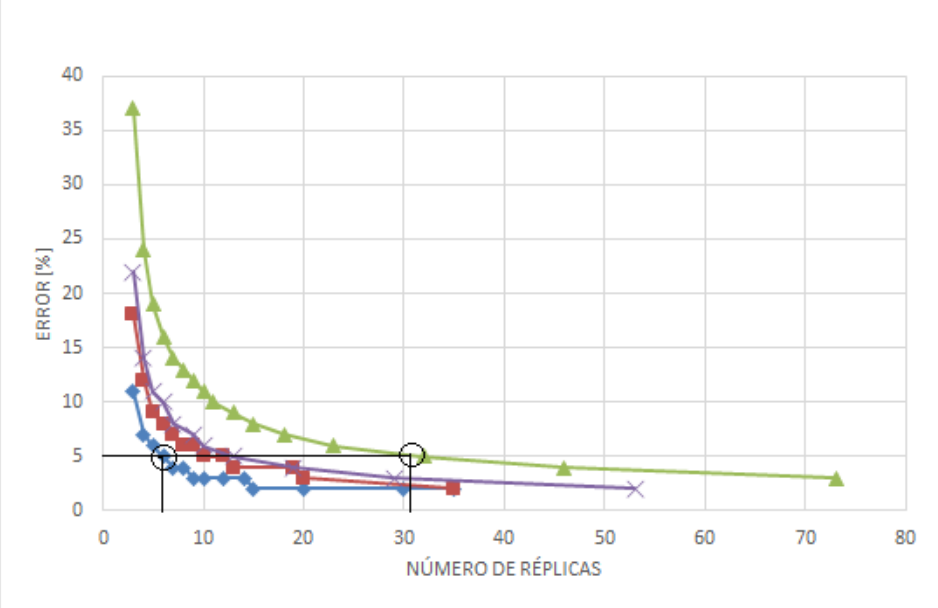


Ilustración 52. Dispersión de los resultados en el tribómetro de cilindro rotatorio para 15° (■), 30° (▲), 45° (◆) y 90° (×).



6.5 IDENTIFICACIÓN DE LOS CAMBIOS EN LA MORFOLOGÍA DEL MATERIAL ABRASIVO

Se evaluó el cambio de la morfología de las partículas abrasivas por medio de la Ilustración 53, que corresponde a la granulometría de una muestra de arena tomada del *slurry* utilizado en los ensayos. En la Tabla 12 se registraron los resultados del tamizado de la muestra.

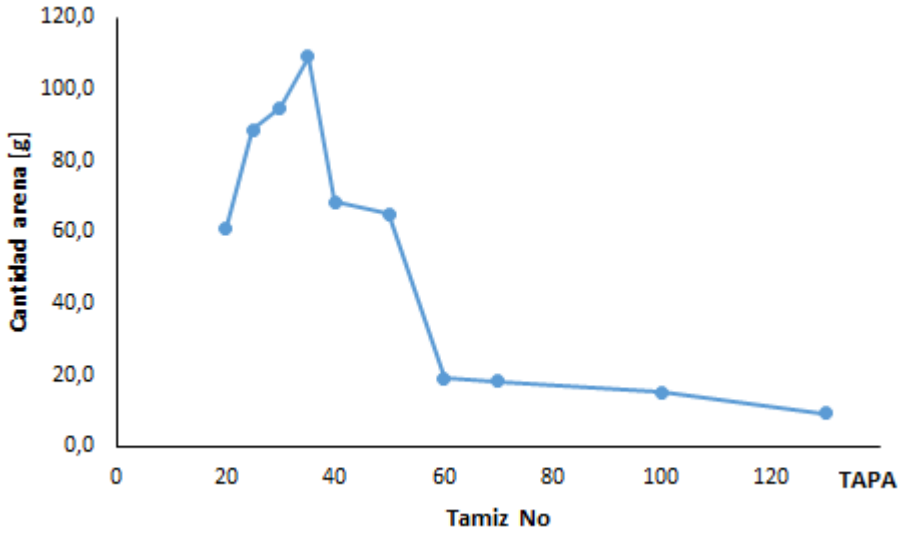
Tabla 12. Tamizado de la arena después de los ensayos.

Tamiz No	Abertura [mm]	Cantidad arena [g]
20	0,850	61,0
25	0,710	88,7
30	0,600	94,6
35	0,500	109,0
40	0,425	68,4
50	0,300	65,0
60	0,280	19,1
70	0,212	18,3
100	0,150	15,1
TAPA	> 0,150	9,4
CANTIDAD TOTAL ARENA		548,6

Teniendo en cuenta que la muestra fue tomada posterior a cinco ensayos de cuatro minutos y se encontraba inicialmente entre los tamices 20 y 30 (entre 600 µm y 850 µm). En la gráfica de la Ilustración 53 se observa que la mayor cantidad de arena se encontró entre los tamices 20 y 50. Además, de la Tabla 12 se puede determinar que sólo un 44,5 % de la arena se conservó dentro del rango de tamaños entre 600 µm y 850 µm.

Al inicio de los ensayos se encontraba el 9,8 % de la arena en el tamiz 20; el 45,2 % en el tamiz 25 y el 44,9 % en el tamiz 30 y al finalizar los ensayos estos porcentajes cambiaron a 11,1 %, 16,2 % y 17,2 % respectivamente, lo cual indica que su hubo variaciones en los tamaños de las partículas abrasivas.

Ilustración 53. Granulometría de la arena después de los ensayos.



6.6 IDENTIFICACIÓN DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE

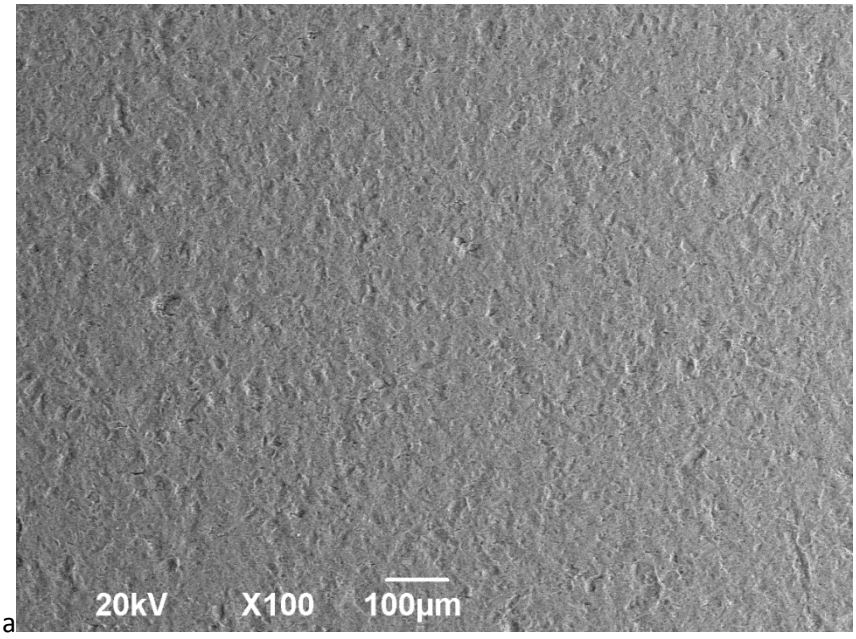
6.6.1 Mecanismos de desgaste en las probetas del tribómetro de cilindro rotatorio.

Después de terminadas las pruebas en el tribómetro de cilindro rotatorio, se limpiaron las probetas con ultrasonido y se observaron las superficies erosionadas en el microscopio electrónico de barrido, con el fin de identificar los principales mecanismos de desgaste, para esto se seleccionaron las probetas ensayadas de 45º y 90º.

La Ilustración 54 y la Ilustración 55 corresponden a las microscopías electrónicas de barrido (SEM), realizadas con electrones secundarios a las probetas que fueron impactadas por las partículas a ángulos de 45 º y 90 º respectivamente. En la Ilustración 54 (b) se muestra la superficie de desgaste de la probeta de 45 º, en la cual se presenta micro corte y deformación plástica en la línea de dirección de las partículas. También, se puede apreciar la inclusión de una partícula en el material base.

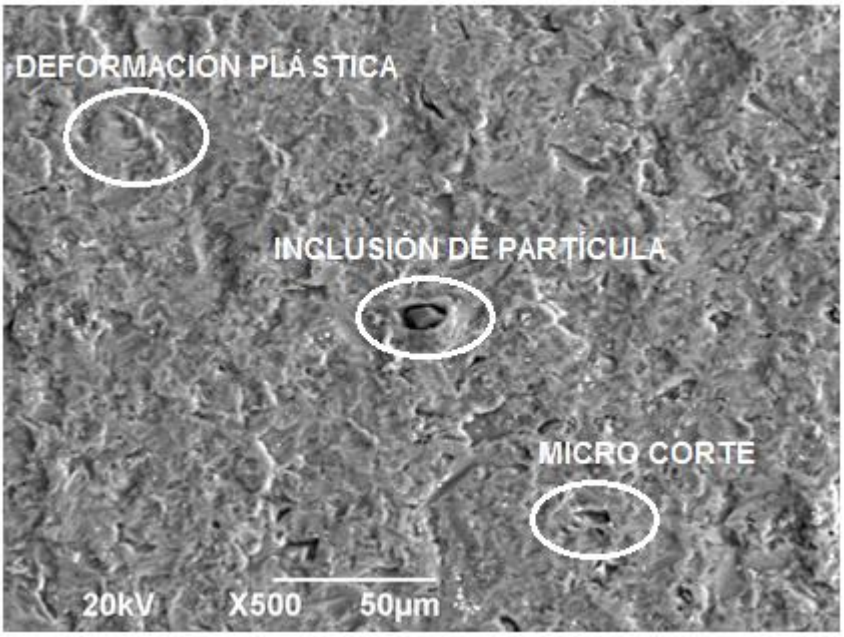
Ilustración 54. SEM realizado a una probeta sometida a desgaste erosivo de 45 º. (a) aumento de 100x (b) aumento de 500x.

(a)



a

(b)



Para definir si la inclusión mostrada en la Ilustración 54 (b) era una partícula de abrasivo o hacía parte del material base, se realizó EDS para determinar la composición química de la partícula. Los resultados obtenidos en el EDS se registraron en la Tabla 13, donde se puede observar que la partícula posee un alto contenido de silicio y oxígeno, de lo anterior se concluye que la partícula es de arena.

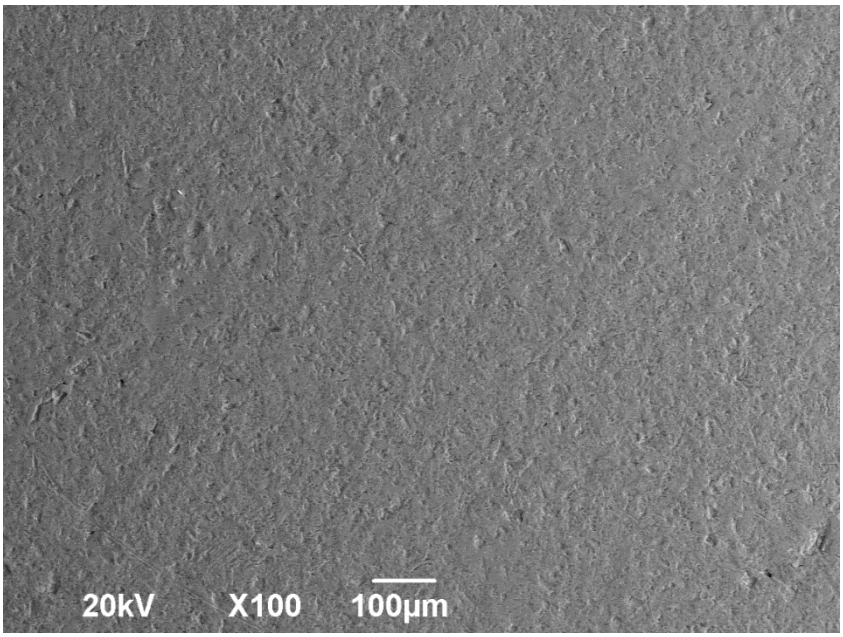
Tabla 13. EDS de la partícula.

Espectro	O	Mg	Al	Si	Fe	As	Total
Espectro 1	59,32	0,00	3,87	36,81	0,00	0,00	100,00

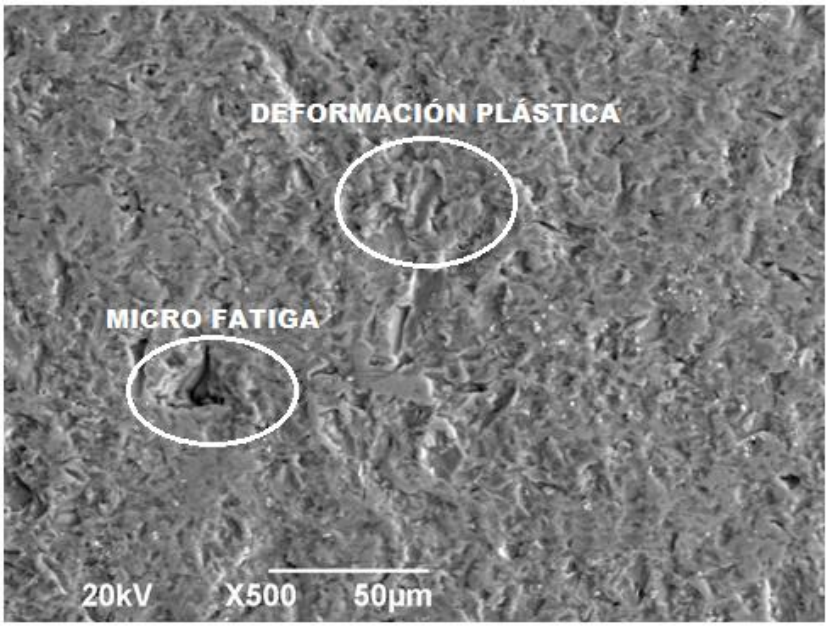
En la Ilustración 55 (b) se muestra la superficie de desgaste de la probeta de 90º, en la cual se evidencia deformación plástica ocasionada por el impacto perpendicular de las partículas en el material, donde el impacto continuo sobre la superficie produce el micro mecanismo de fatiga que se evidencia por desprendimiento de fragmentos de material que se observan como cráteres sobre la superficie.

Ilustración 55. SEM realizado a una probeta sometida a desgaste erosivo de 90 º (a) aumento de 100x (b) aumento de 500x.

(a)



(b)



Al comparar la Ilustración 54 (a) con Ilustración 55 (a) se observa que en la Ilustración 54, correspondiente a la superficie de desgaste de la probeta de 45°, se muestra con mayor degradación superficial, lo cual coincide con lo encontrado en los ensayos, debido que a este ángulo se presentó una mayor tasa de desgaste que en el de 90°.

6.6.2 Mecanismos de desgaste en las probetas del tribómetro tipo chorro de agua.

Terminadas las pruebas en el tribómetro tipo chorro de agua, se limpiaron las probetas con ultrasonido y se observaron las superficies erosionadas en el estereoscopio, con el fin de identificar la degradación superficial y comparar cada ángulo de impacto evaluado. En la Ilustración 56, Ilustración 57 e Ilustración 58 se pueden observar las superficies de desgaste obtenidas a 15°, 45° y 90° respectivamente.

Al comparar las superficies de desgaste obtenidas, se puede observar que se presentó una mayor degradación en la probeta de 45°, seguida por la de 15° y finalmente la de 90°. En la Ilustración 57, correspondiente a la superficie de desgaste de 45° se observan cráteres más profundos que los presentes en las demás superficies, lo cual coincide con lo esperado, debido a que este fue el ángulo crítico en los ensayos.

Ilustración 56. Superficie de desgaste obtenida en el tribómetro tipo chorro de agua a 15°.

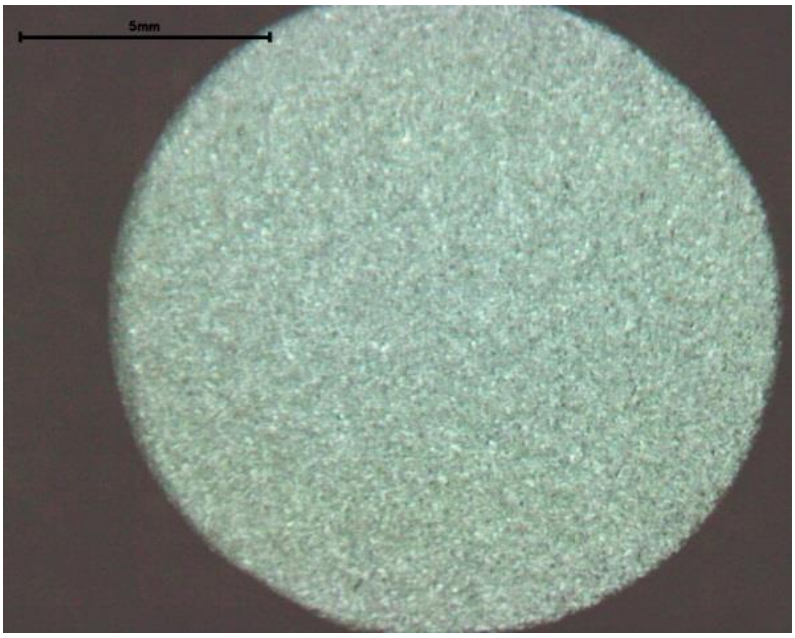


Ilustración 57. Superficie de desgaste obtenida en el tribómetro tipo chorro de agua a 45°.

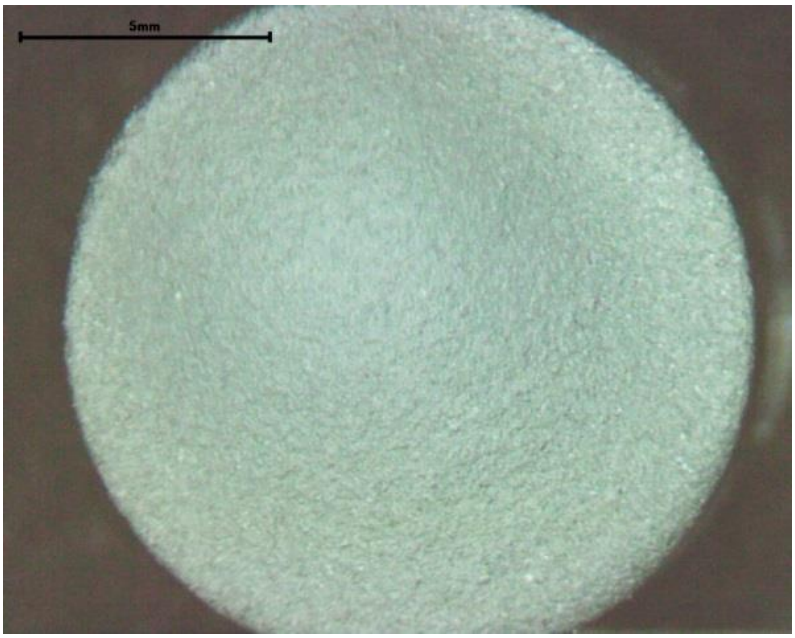
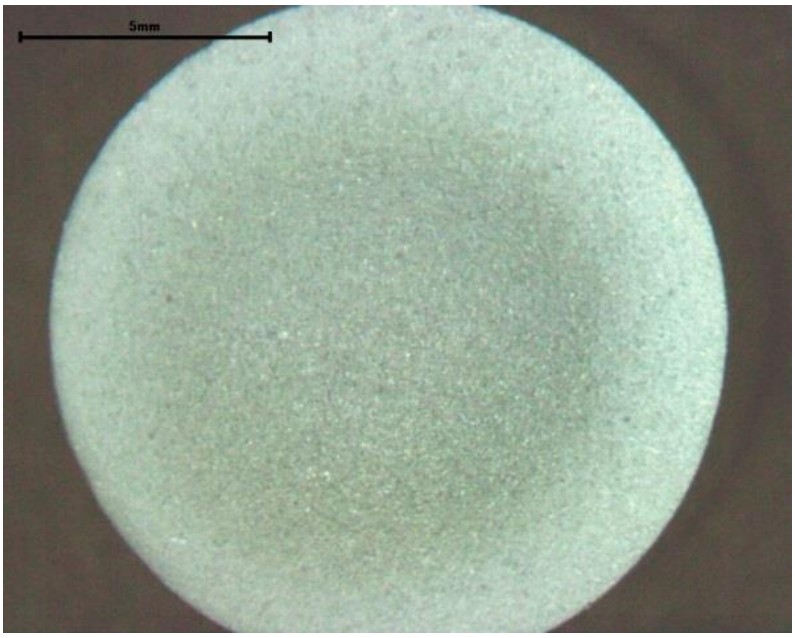


Ilustración 58. Superficie de desgaste obtenida en el tribómetro tipo chorro de agua a 90°.



En la Ilustración 59 se muestran las superficies de desgaste obtenidas en las pruebas realizadas en ambos tribómetros. Se observa que pese a que el tiempo de ensayo fue mayor en el tribómetro de cilindro rotatorio, se presentó mucho más desgaste en las probetas del tribómetro tipo chorro de agua, puesto que, en éste equipo debido a su configuración se pudieron realizar ensayos a una velocidad aproximadamente 14 veces mayor que en el otro quipo. Esto demuestra la relevancia que tiene el parámetro de la velocidad de impacto en el desgaste erosivo.

Se pudo observar en las probetas del tribómetro tipo chorro de agua que la probeta de 45° fue la más afectada por el fenómeno de desgaste erosivo, con una tasa de desgaste de 0,0273 g/h, lo que confirma la importancia que tiene el efecto del ángulo de impacto de las partículas en el desgaste erosivo.

Ilustración 59. Superficies de desgaste obtenidas en ambos tribómetros a 15°, 45° y 90°



7. CONCLUSIONES

En este documento diseñó y construyó un tribómetro tipo chorro de agua. Asimismo, se realizaron pruebas de desgaste erosivo en este equipo y en un tribómetro de cilindro rotatorio, para luego comparar el comportamiento de ambos equipos. Las pruebas se efectuaron en un material documentado en la literatura, bajo las mismas condiciones de concentración y ángulos de impacto.

- Se diseñó y construyó un tribómetro tipo chorro de agua que se caracteriza por ser innovador, práctico y económico, debido a que sólo requiere de aire comprimido para su funcionamiento. Este equipo puede simular de manera aproximada el desgaste producido en los materiales por impacto constante de partículas que se encuentran inmersas en un fluido con concentraciones hasta del 30%, velocidades de impacto promedio superiores a los 100 m/s y ángulos de 0° a 90° cada 5°. Además, también se pueden hacer variaciones en la distancia de impacto del chorro.

- Se determinó que la línea de tendencia de la gráfica tasa de desgaste en función del ángulo de impacto obtenida en los ensayos, presenta un comportamiento similar a la de los ensayos del artículo *Design of a Slurry Erosion Test Rig.*

- Se evaluó en el tribómetro tipo chorro de agua la resistencia al desgaste a diferentes ángulos en una aleación de aluminio envejecida artificialmente, impactada por *slurry* a una velocidad de 122,39 m/s, con una concentración del 17% y compuesto por agua y partículas de cuarzo entre 600 µm y 850 µm. Los ángulos evaluados fueron 15°, 30°, 45°, 60° y 90°. Se encontró que el ángulo donde se presentó la mayor tasa de desgaste fue 45°, y por el contrario se obtuvo una menor tasa de desgaste a 90°.

- Se evaluó en el tribómetro de cilindro rotatorio la resistencia al desgaste a diferentes ángulos en una aleación de aluminio envejecida artificialmente, impactada por *slurry* a una velocidad de 8,3 m/s, con una concentración del 17% y compuesto por agua y partículas de cuarzo entre 600 µm y 850 µm. Los ángulos evaluados fueron 15°, 30°, 45° y 90°. Se encontró que el ángulo donde se presentó la mayor tasa de desgaste fue 45°, y por el contrario se obtuvo una menor tasa de desgaste a 30°.

- Se determinó que la línea de tendencia de la gráfica tasa de desgaste en función del ángulo de impacto obtenida en los ensayos del tribómetro de cilindro rotatorio, no presenta un comportamiento similar a la de los ensayos en el tribómetro tipo chorro de agua, ni a la reportada en la literatura para materiales dúctiles.

- Se determinó que para obtener errores en los resultados de los ensayos por debajo del 5% en el tribómetro de chorro de agua, se deben realizar entre tres y seis réplicas dependiendo del ángulo evaluado, mientras que en el tribómetro de cilindro rotatorio se requieren entre 6 y 32 réplicas.

- Se encontró que sólo un 44,5% de las partículas abrasivas conservaron su morfología después de cinco ensayos en el tribómetro tipo chorro de agua.

- Se encontró que en la superficie de desgaste de 45° obtenida en el tribómetro de cilindro rotatorio, se presentaron mecanismos de desgaste de micro corte, deformación plástica e inclusión de partículas; mientras que en la superficie de desgaste de 90° se evidenció deformación plástica y micro fatiga.

8. RECOMENDACIONES

- Para una mayor durabilidad, se recomienda fabricar el tanque y el porta-probetas en un material con alta resistencia a la corrosión y al desgaste, se podría pensar en algún tipo de acero inoxidable.

- Para trabajos futuros, se recomienda que si se desea comparar los resultados obtenidos por medio de ensayos con resultados encontrados en la literatura, se debe verificar que en los ensayos encontrados en la literatura se encuentren bien especificadas todas las variables de operación utilizadas; además que las gráficas muestren las barras de error.

- Para evitar el desgaste presentado en el porta-muestras, se recomienda incrementar el diámetro del agujero donde se coloca la muestra para incorporar en él la pieza propuesta para evitar el desgaste.

- Medir la velocidad de impacto del chorro por medio de una celda de carga acoplada al porta-muestras.

- Proponer un trabajo de grado del diseño hidráulico del eyector.

REFERENCIAS

[1] M. S. T.Manisekaran, "Slurry erosion studies on surface modified 13Cr-4Ni steels: effect of angle of impingement and particle size," *Journal of Materials Engineering and Performance,* pp. 567-572, 2007.

[2] J. Chavez, «Diseño, Construcción e Evaluación de un Tribómetro de Slurry,» Universidad del Valle, Cali, 2013.

[3] J.G.A.Bitter, "A Study of Erosion Phenomena," *Wear 6,* pp. 5-21, 169-190, 1962.

[4] B. G.R.Desale, "Slurry Erosion of Ductile Materials Under Normal Impact Condition," *Wear 264,* pp. 322-330, 2008.

[5] W. Stachowiak y W. Batchelor, Abrasive, Erosive and Cavitation Wear, Engineering Tribology (tercera edición), 2006.

[6] V. 1. ASM Handbook, "Friction, Lubrication and Wear Technology," *ASM International, Materials Park,* 1992.

[7] I.Finnie, "Erosion of Surfaces by Solid Particles," *Wear,* pp. 87-103, 1960.

[8] K. Ludema and H. Meng, "Wear Models and Predictive Equations: Their Form and content," *Wear,* pp. 443-457, 1995.

[9] I.M.Hutchings, Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Butterworth-Heinemann, 1992.

[10] «buenas tareas,» mayo 2012. [En línea]. Available: http://www.buenastareas.com/ensayos/Calculo-Densidades-De-Ripios/4335999.html. [Último acceso: 06 agosto 2014].

[11] D. Beattie y P. Whalley, «A Simple Two-Phase Frictional Pressure Drop Calculation Method, Int J of Multiphase Flow,» 1982.

[12] J. Balanzá, «monografías,» [En línea]. Available: http://www.monografias.com/trabajos68/claculo-recipientes-presion-pared-delgada/claculo-recipientes-presion-pared-delgada2.shtml. [Último acceso: 01 08 2014].

[13] B. J. Hamrock, B. Jacobson y S. R. Schmid, Fundamental of Machine Elements, Mc Graw Hill.

[14] A. Perez, «Mecadepia: Enciclopedia Virtual de Ingeniería Mecánica,» 23 06 2014. [En línea]. Available: http://www.mecapedia.uji.es/criterio_de_von_Mises.htm. [Último acceso: 01 08 14].

[15] R. Bird, W. E. Stewart y E. N. Lightfoot, Fenómenos de transporte, Repla s.a, 1987.

[16] H. Caicedo, «Evaluación de la Sinergia Corrosión-Erosión en Materiales Base de Mazas de Molinos de Caña de Azucar,» Universidad del Valle, Cali, 2006.

[17] A. V. Uscategui, «Caracterización Electroquímica de Fermanal Expuesto a Condiciones Corrosivas-Erosivas,» Universidad del Valle, Cali, 2008.

[18] H. Grewal, A. Agrawal and H. Singh, "Design and Development of High-Velocity Slurry Erosion Test Rig Using CFD," *Journal of Materials Engineerging and Performance,* pp. 152-161, January 2013.

[19] J. Baena, «Interdependencia Entre las Condiciones de Operación y el Desgaste en Rodetes Tipo Pelton Fabricados en Acero ASTM AT43 Grado CA6NM,» Medellín, 2088.

[20] J. Zu, I. Hutchings and G. Burstein, "Design of a Slurry Erosion Test Rig," *Wear,* pp. 331-344, 1990.

[21] N. Yngve, «Material Removal Mechanism of Ni(200) when Eroded by a Slurry at 30° Incidence,» *Wear,* vol. 105, pp. 123-130, 1985.

[22] M. Lin, L. Chang, H. Lin, C. Yang and K. Lin, "A Study of High-Speed Slurry Erosion of NiCrBSi Thermal-Sprayed Coating," *Surf.Coat.Technol.,* pp. 3193-3198, 2006.

[23] J. Santa, L. Espitia, J. Blanco, S. Romo and A. Toro, "Slurry and Cavitation Erosion Resistence of Thermal Spray Coatings," *Wear,* pp. 160-167, 2009.

[24] R. Wood, B. Mellor y M. Binfield, «Sand Erosion Perfomance of Detonation Gun Applied Tungsten Carbide/Cobalt-Chromiun Coatings,» *Wear,* vol. 211, pp. 70-83, 1997.

[25] M. Matsumura, «Wear of Materials 1983: Presented at the International Conference on Wear of Materials,» *American Society of Mechanical Engineers,* 1983.

[26] S. Turenne, «The Effect of Sand Concentration on the Erosion of Materials by a Slurry Jet,»

Wear, vol. 133, pp. 95-106, 1989.

[27] A. Neville y B. Mcdougall, «Erosion and Cavitation-Corrosion of Titanium and its Alloys,» *Wear,* vol. 250, pp. 726-735, 2001.

[28] J. Suchanek, V. Kuklik y E. Zdravecka, «Influence of Microstructure on Erosion Resistance of Steels,» *Wear,* vol. 267, pp. 2092-2099, 2009.

[29] Y. Li, G. Burstein y I. Hutchings, «Influence of Environmental Composition and Electrochemical Potential on the Slurry Erosion-Corrosion of Aluminium,» *Wear,* Vols. %1 de %2181-183 (parte1), pp. 70-79, 1995.

[30] G. Burstein y K. Sasaki, «Effect of Impact Angle on the Slurry Erosion-Corrosion of 304L Stainless steal,» *Wear,* vol. 240, pp. 80-94, 2000.

[31] Q. Fang, P. Sidky y M. Hocking, «Erosive Wear Behaviour of Aluminium Based Composites,» *Materials and Design,* vol. 18, pp. 389-393, 1997.

[32] G. Saha, T. Khan y G. Zhang, «Erosion-Corrosion Resistance of Microcrystalline and Near-Nanocrystalline WC-17Co High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray Coatings,» *Corrosion Science,* vol. 53, pp. 2106-2114, 2011.

[33] M. A. Bolaños, «Evaluación de las propiedades mecánicas de uniones soldadas de la aleación de Aluminio AA 6261,» Cali.

[34] ASM Handbook, Volumen 9, Metallography and Microstructures.

[35] S. S. Akhtar, A. F. M. Arif y B. S. Yilbas, «Performance of Al-6063 Primary and Secondary Billets Used in Hot Aluminum Extrusion,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* vol. 131, 2009.

[36] W. Rasband, *ImageJ,* 1997.

[37] ASTM, «ASTM G119-09 Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion».

[38] I. Finnie y G. Sheldon, «On Ductile Behaviour of Nominally Brittle Materials During Erosive Cutting,» *ASME,* vol. 88B, pp. 387-392, 1996.

[39] G. Sheldon y I. Finnie, «On the Ductile Behavior of Nominally Brittle Materials During Erosive Cutting,» *Journal of Manufacturing Science and Engineering: ASME,* vol. 88, nº 4, pp. 387-392,

1996.