

**DISEÑO, CONSTRUCCION Y PRUEBA DE UN EQUIPO PARA LA
DETERMINACION DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO EN SECO
DE MATERIALES**

CRISTHIAN FERNANDO HERNÁNDEZ GONZÁLEZ

ID 000 199709

CRISTIAN CAMILO MORENO REYES

ID 000 241620



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
2018**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN EQUIPO PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO EN SECO
DE MATERIALES**

**CRISTHIAN FERNANDO HERNÁNDEZ GONZALEZ
CRISTIAN CAMILO MORENO REYES**

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
ingeniero mecánico**

**Director
M. Sc. Alfonso Santos**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2018

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma de jurado

Firma de jurado

Bucaramanga-Santander 18 de septiembre de 2018

Bucaramanga 18 de septiembre de 2018

Señores:

COMITÉ DE PROYECTO DE GRADO

Facultad de ingeniería mecánica

Atte. Ing Jairo Blanco

Por medio de la presente me permito dar el visto bueno, para que los estudiantes CRISTIAN CAMILO MORENO REYES ID: 000241620 y CRISTHIAN HERNANDEZ ID:000199709, entreguen el proyecto de grado titulado "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN EQUIPO PARA LA DETERMINACION DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO EN SECO DE LOS MATERIALES",

Cordialmente.



M. Sc. ALFONSO SANTOS JAIMES

Director de proyecto de grado.

DEDICATORIA

Le dedico este triunfo primero que todo a Dios por haberme regalado una familia tan especial que me apoyo de principio a fin en este proyecto de vida universitaria y me inculco grandes valores para ser una gran persona.

Le dedico este logro a mi hijo que es la luz que ilumina mi vida y me llena de gran orgullo y felicidad al ver su rostro lleno de alegría cuando me dice papa.

A mi papa por haberme brindado sus consejos, su sabiduría, su tiempo, su amor y su apoyo incondicional en todo momento durante este proceso.

A mi mama por haberme dado la vida y apoyado con sus consejos en los momentos más difíciles.

A mis abuelos por estar pendiente de mí en este proceso dándome sus consejos y gran sabiduría.

A mi novia por estar siempre pendiente de mí y haberme brindado su amor y ayuda motivacional.

A las personas que contribuyeron, aportaron y compartieron conmigo cualquier consejo, apoyo y momentos de su vida.

Cristhian Hernández

DEDICATORIA

Primero que todo quiero darle gracias a Dios por permitirme presentar este proyecto satisfactoriamente, que se hizo con toda la humildad y entrega para aportar a las áreas de conocimiento de la Universidad Pontificia Bolivariana

Así mismo quiero darte mis más sinceras gracias a mi familia que siempre ha estado en los momentos difíciles, son mi motor para seguir y luchar por cumplir mis objetivos para esto tengo a mis mentores para los cuales tengo la admiración para surgir y ser un profesional respetado donde su valor principal es la humildad ya que esa gran virtud es propia de mi padre y de mi madre que con su amor nos han sacado adelante a mi hermana y a mí.

Cada triunfo que obtenga en mi vida son para esas personas importantes que siempre me han aportado cosas para surgir más como persona y como profesional, así mismo mis agradecimientos para esa mujer que me ayudo en cada instante de nubosidad en mi vida como en mi carrera, que con su empatía me hizo ver la vida de una bonita forma y a ser mucho más focalizado en las cosas que verdaderamente importan.

A mis abuelos también les rindo un homenaje en mi vida por enseñarme infinitas virtudes, que siempre hay que ver la vida con bonitos ojos y sobretodo hay que ser feliz a pesar de los problemas, a mi abuelito muchísimas gracias por apoyarme, es una de las personas más importantes en mi vida, lo amo y cualquier triunfo que tenga en la vida va dedicado a él.

En general mil gracias a todas las personas que me han apoyado. Familia, amigos y cada persona que siempre me ayuda a mi crecimiento personal y profesional.

Cristian Moreno

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo darle gracias a Dios por darnos la salud, la sabiduría y por permitirnos llevar a cabo este proceso de aprendizaje, a nuestros familiares que siempre estuvieron apoyándonos en todo momento tanto moralmente como económicamente.

Agradecer a nuestro director de tesis el ingeniero Alfonso Santos por su dedicación, críticas y consejos que fueron de vital importancia en este proceso.

Agradecer al ingeniero Edwin Córdoba Tuta por su sabiduría y consejos acerca del diseño del dispositivo de propulsión de partículas.

Agradecer a Ludwing por sus consejos y colaboración en el taller a la hora de la fabricación del equipo, gracias al ingeniero Víctor por el apoyo y colaboración en la realización de las imágenes en el microscopio electrónico de barrido.

Al ingeniero Sergio Gómez por su intervención y ayuda para poder prestar los laboratorios de metrología e ingeniería civil

A la universidad Pontificia Bolivariana por permitirnos llevar a cabo la realización de este proyecto en sus laboratorios.

Contenido

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	17
1.1. OBJETIVO GENERAL	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1. DESGASTE	18
2.2. TIPOS DE DESGASTE	19
2.2.1. Desgaste adhesivo	19
2.2.2. Desgaste abrasivo	20
2.2.3. Desgaste corrosivo	22
2.2.4. Desgaste por fatiga	23
2.2.5. Desgaste erosivo	25
2.2.6. Desgaste por cavitación.....	26
2.2.7. Desgaste erosivo en seco de materiales.....	27
2.3. RECUBRIMIENTO POR ROCIADO TÉRMICO	28
2.4 MATERIALES PARA RECUBRIMIENTOS	31
2.4.1 Carburo de tungsteno	32
2.5. NORMA ASTM G76–13: MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA REALIZAR PRUEBAS DE EROSIÓN POR IMPACTO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS UTILIZANDO CHORROS DE GAS.....	33
2.5.1. Metodología según la norma ASTM G76-13.....	34
2.6. EQUIPOS QUE SE UTILIZAN EN EL ENSAYO	36
2.6.1. Medidor Venturi	36
2.6.2. Función de la tolva	37
2.6.3 Microscópio electrónico de barrido	38
3. DISEÑO DEL EQUIPO	40
3.1. DISEÑO DE LA LÍNEA DE AIRE	40
3.2. DISEÑO DEL TUBO VENTURI	40
3.3. DISEÑO DE LA BOQUILLA	43
3.4. DISEÑO DE LA PORTA-PROBETA	43
3.5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA.....	45
4. RESULTADOS DEL EQUIPO	47

4.1. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO EN SECO DE MATERIALES	47
4.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL EQUIPO	48
4.2.1. Calibración del equipo	48
4.3. PROCEDIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRUEBA DE DESGASTE	52
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS	53
5.1. ANÁLISIS CUANTITATIVO	53
5.2. ANÁLISIS CUALITATIVO	56
5.2.1. Micrografías de la probeta sin recubrimiento	56
5.2.2. Micrografías de la probeta con recubrimiento	59
6. CONCLUSIONES	61
7. RECOMENDACIONES	62
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
9. ANEXOS	66
Anexo A. Foto del adaptador galvanizado	66
Anexo B. Foto del tubo roscado NPT.	67
Anexo C. Fotos de las probetas, el embudo y el imán utilizados en las pruebas	68
Anexo D. Planos de ensamble total del equipo a utilizar	70
Anexo E. Planos del ensamble de la caja del equipo	71
Anexo F. Planos del soporte tubo Venturi	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de materiales usados para recubrimiento (tomado de SULZER, 2013 [19]).....	29
Tabla 2. Propiedades físicas y composición de materiales de carburo de tungsteno (tomado de RICHERT, MAZURKIEWICZ & SMOLIK, 2012 [21]).....	30
Tabla 3. Valores Promedios de las pruebas sin recubrimiento y con recubrimiento.....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Daño en rodamiento causado por el desgaste.....	16
Figura 2. Mecanismos de desgaste adhesivo.....	18
Figura 3. Tipos de abrasión.....	19
Figura 4. Superficie satinada por causa de partículas abrasivas.....	19
Figura 5. Turbocompresor oxidado debido a altas temperaturas.....	20
Figura 6. Desgaste por fatiga (tomado de: Luengo-López, 2008 [8]).....	21
Figura 7. Daño en engranaje por fatiga.....	22
Figura 8. Hélice desgastada por erosión.....	22
Figura 9. Ábabe de una turbina afectado por la cavitación.....	24
Figura 10. Desgaste erosivo (tomado de RABINOWICZ, 1995 [10])	25
Figura 11. Etapas del recubrimiento por rociado térmico (tomado del catálogo Mirror roller).....	26
Figura 12. Rociado térmico (tomado de BEGRIFFE, 1994 [18]).....	27
Figura 23. Esquema para el ensayo erosivo en seco según la norma ASTM G 76-13.....	31
Figura 14. Tubo Venturi (tomado de PÉREZ y RENEDO, 2013 [22]).....	33
Figura 15. Embudo o tolva.....	34
Figura 16. Microscopio electrónico de barrido (tomado de GOODHEW, HUMPHREYS & BEANLAND, .1988 [23]).....	35
Figura 17. Línea de presión (tomado de García, MEJÍA y MESA, 2004 [24]).....	36
Figura 18. Medidor de flujo Venturi (tomado de BOLÍVAR, 2012 [25]).....	37
Figura 19. Planos Venturi.....	38
Figura 20. Planos boquilla.....	41
Figura 21. Porta-probeta.....	42
Figura 22. Porta-probeta ensamblado.....	43
Figura 23. Prototipo realizado en solidworks,.....	44

Figura 24. Proceso de construcción del prototipo.....	45
Figura 25. Prototipo ensamblado (vista total y vista parcial)	46
Figura 26. Medición de la velocidad de salida de la boquilla.....	47
Figure 27. Tamizaje de arena en tamaño de 200 μm	48
Figure 28. Micrografía de la arena después del proceso de tamizaje.....	49
Figure 29. Espectro EDS usado para determinar la composición química de la arena.....	49
Figura 30. Perfil de desgaste erosivo para las probetas en función del tiempo.....	51
Figura 31. Perfil de desgaste erosivo para diferentes materiales en función del tiempo (tomado de GARCÍA, MEJÍA y MESA, 2004 [24]).....	52
Figura 32. Perfil de desgaste erosivo para las probetas con recubrimiento en función del tiempo.....	53
Figura 33. Foto de la probeta AISI 1020 antes y después de la prueba.....	54
Figura 34. Foto de la probeta AISI 1020 con recubrimiento antes y después de la prueba.....	54
Figura 35. Micrografías de la probeta sin recubrimiento antes de las pruebas de desgaste: a la izquierda imagen tomada con 1000x y a la derecha imagen tomada con 5000x.....	55
Figura 36. Micrografías de la probeta sin recubrimiento después de las pruebas de desgaste: arriba a la izquierda: después de la primera prueba, arriba a la derecha: después de la tercera prueba y abajo después de la quinta prueba. Todas las imágenes fueron tomadas a 5000x.....	56
Figura 37. Micrografías de la probeta con recubrimiento antes de las pruebas de desgaste: a la izquierda imagen tomada con 1000x y la derecha imagen tomada con 250x.....	57
Figura 38. Micrografías de la probeta con recubrimiento después de las pruebas de desgaste: arriba a la izquierda: después de la primera prueba tomada a 100x, arriba a la derecha: después de la tercera prueba tomada a 2000x y abajo: después de la quinta prueba tomada a 2000x.....	58

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO EN SECO DE MATERIALES

AUTOR(ES): Cristhian Fernando Hernandez González
Cristian Camilo Moreno Reyes

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Alfonso Jaimes Santos

RESUMEN

Este proyecto tiene como finalidad diseñar y construir un equipo que permita realizar ensayos de desgaste erosivo en seco según lo especifica la norma ASTM G76/13 "método de prueba estándar para llevar a cabo pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas utilizando impulsores de gas", las pruebas de verificación del buen funcionamiento del equipo se realizaran mediante ensayos a acero AISI 1020 y los resultados se compararan con los reportados en la literatura; adicional mente se realizaran ensayos a probetas de acero recubiertas con carburo de tungsteno de tamaño micrométrico.

PALABRAS CLAVE:

Norma ASTM G76/13, Carburo de tungsteno, erosivo

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN, CONSTRUCTION AND TESTING OF A DEVICE FOR THE DETERMINATION OF THE RESISTANCE TO EROSION DRY WEAR OF MATERIALS

AUTHOR(S): Cristhian Fernando Hernandez González
Cristian Camilo Moreno Reyes

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Alfonso Jaimes Santos

ABSTRACT

This project aims to design and build a dispositive that allows testing of dry erosive wear as specified in ASTM G76/13 "standard test method for conducting solid particle impact erosion tests Using gas jets", the testing of the proper functioning of the equipment is carried out by means of tests in AISI 1020 steel and the results are compared with those reported in the literature; Additionally , tests will be carried out on steel specimens coated with tungsten carbide of micrometric size.

KEYWORDS:

ASTM G76/13, TUNGSTEN CARBIDE, EROSION

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

El desgaste ha sido un tema de vital importancia y estudio a tratar en la industria por los distintos daños y pérdidas económicas que este ocasiona. A medida que ha pasado el tiempo se han realizado numerosos estudios sobre cómo reducir las consecuencias de este problema en equipos y máquinas que se presenta por las condiciones extremas y agresivas de trabajo a la que están sometidas llegando a crear técnicas como la lubricación que consiste aplicar un fluido con propiedades lubricantes a piezas que están en contacto con el fin de mejorar la vida útil, proteger y eliminar la fricción, el recubrimiento que consiste en recubrir una superficie con otro material con el fin de protegerla de los distintos mecanismos de desgaste y disminuir la pérdida progresiva de masa en un material o componente de una máquina, evitando cambios en las tolerancias que este ocasiona y prolongando su vida útil.

Existen distintos mecanismos de desgaste que ocasionan daños en las piezas o maquinaria, por nombrar algunos se destacan; el desgaste abrasivo, desgaste erosivo, desgaste corrosivo, desgaste por fatiga, desgaste por cavitación y por último el desgaste erosivo en seco de materiales que es el de nuestro tema de estudio a tratar.

Cada tipo de desgaste tiene su propia condición y origen que lo ocasiona, por esto para hallar una solución primero se debe determinar qué tipo de desgaste está ocasionando el daño.

En este documento se determina la pérdida de material del acero AISI 1020 que se produce por la erosión en seco de un material abrasivo, en este caso fue usada arena y a seguir se comparó con estudios realizados anteriormente basados en la Norma ASTM G76-13. Como condición de desgaste se usó el método de recubrimiento por rociado térmico para recubrir la superficie de un material, el cual fue acero AISI 1020 con carburo de tungsteno a fin de comparar los resultados con los obtenidos anteriormente en el estudio, para finalmente determinar si mejora la

resistencia al desgaste erosivo, esto con el objetivo de estudiar una posible alternativa a este tipo de desgaste.

Para llevar a cabo las pruebas de desgaste erosivo en seco es necesario diseñar un equipo que sea capaz de erosionar una superficie ya que la Universidad Pontificia Bolivariana no cuenta con un equipo de estos en sus laboratorios. Dicho equipo fue construido basado en los parámetros que dicta la norma ASTM G76-13 para tratar de reducir el margen de error lo máximo posible.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y probar un equipo para la determinación de la resistencia al desgaste erosivo en seco de materiales mediante el cumplimiento de las exigencias de la norma ASTM G76/13, para su implementación en la caracterización de materiales metálicos y recubrimientos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el diseño adecuado para construir un equipo que permita la realización de ensayos de desgaste erosivo en seco a materiales mediante el cumplimiento de las exigencias de la norma ASTM G76/13, para lo cual se obtendrán los respectivos planos.
- Llevar a cabo la construcción del equipo que permita la realización de ensayos de desgaste erosivo en seco a materiales mediante el uso de materiales disponibles en la región y los planos detallados obtenidos del proceso de diseño.
- Comprobar el correcto funcionamiento del equipo mediante la realización de ensayos a probetas de acero AISI 1020.
- Comparar los resultados obtenidos en las pruebas y verificar que las variaciones no deben superar el 20% con respecto a los datos reportados en la literatura para estos materiales.
- Realizar ensayos de desgaste erosivo en seco a recubrimientos de carburo de tungsteno depositado sobre acero AISI 1020, a través de las especificaciones reportadas en la norma ASTM G76/13.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DESGASTE

El desgaste es el fenómeno que provoca la pérdida progresiva de material de una o dos superficies en que se encuentra en movimiento relativo al entrar en contacto, dando como resultado el deterioro de las maquinas afectando su vida útil, geometría y eficiencia.¹

Todas las maquinas, equipos y sus piezas que están sometidos a trabajos y condiciones con el tiempo se van deteriorando y todo esto es por el desgaste que se presenta en los diferentes entornos (ver Figura 1).

Esto es una molestia en la industria ya que el deterioro de las maquinas produce perdidas económicas como, por ejemplo, el cambio constante de piezas en maquinaria que lleva a paradas de producción, adquisición de un nuevo equipo por daño como lo es una bomba o pérdidas de potencia en un motor causado por la vibración debido al desgaste de los rodamientos o ejes.²



Figura 1. Daño en rodamiento causado por el desgaste.

¹ SINATORA, Amilton. "Notas de clase de la disciplina, Introducción al estudio del desgaste". Universidad de São Paulo-Brasil, 2002.

² BAYER, Raymond. Fundamentals of wear failures [en línea], 2002 [revisado 28 de julio 2018]

En la mayoría de los casos el desgaste se produce por mala lubricación entre los componentes, por cargas demasiado altas, por tiempos prolongados de trabajo, por mal montaje de las piezas, por mal diseño de piezas y por entorno en donde hay condiciones como cambios bruscos de presión, temperatura, gases en el ambiente, humedad y suciedad. Es decir, que es muy difícil de que las piezas y la maquinas no sufran desgaste, pero si puede lograr que ese desgaste sea de una magnitud menor.

2.2. TIPOS DE DESGASTE

Existen diferentes tipos de desgaste que ocurren simultáneamente, así como diferentes mecanismos de desgaste que atacan distintas zonas de la industria entre ellos se encuentra el desgaste adhesivo, el desgaste abrasivo, el desgaste por fatiga, el desgaste por cavitación y el desgaste erosivo en seco, siendo este último el de interés en este estudio.³

2.2.1. desgaste adhesivo

El desgaste adhesivo ocurre cuando dos superficies que se están deslizando con movimiento relativo entran en contacto y se sueldan formando fuertes uniones dando como resultado la transferencia de masa de una superficie a la otra siendo la superficie más blanda la que pierda material.⁴

Este desgaste se da cuando dos materiales entran en contacto por fuerzas de grandes magnitudes de adhesión (ver Figura 2). No siempre se presenta transferencia de material en ocasiones, el material se desprende de las dos superficies.

³ MESA, G. H. D., Sinatora, A. El desgaste de materiales, enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos. Scientia et Technica [en línea], 1997 [revisado 30 de mayo 2018].

⁴HIRANI, Harish. Adhesive wear. Lecture #7

Existen casos en donde el material no puede ceder más y las asperezas se deforman plásticamente hasta incrementar el área de contacto para poder soportar la carga dando como resultado la soldadura en frío.⁵

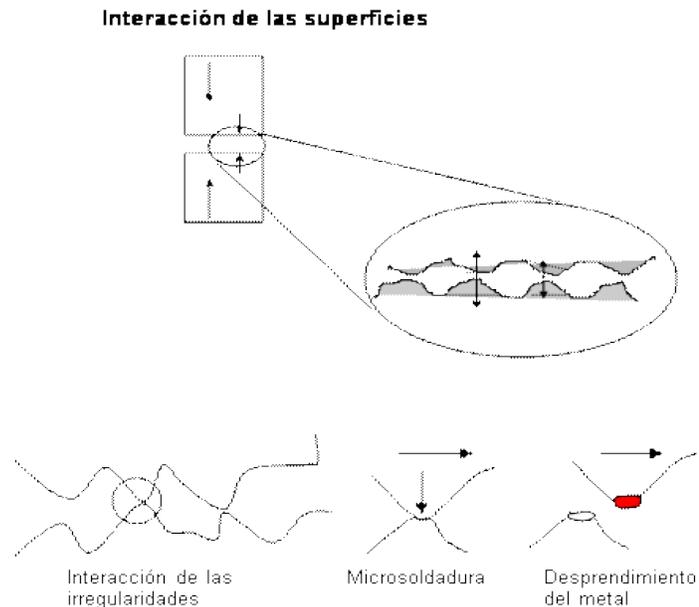


Figura 2. Mecanismos de desgaste adhesivo.

El desgaste adhesivo es considerado severo ya que en ocasiones se pueden observar grandes porciones de material desgarrado. Este desgaste ocurre por deficiencia de lubricación lo que hace que se llegue a altas temperaturas hasta producir la fundición, altas velocidades, cargas excesivas y problemas en los montajes.⁵

2.2.2. Desgaste abrasivo

El desgaste abrasivo es la pérdida o remoción de material producido partículas libres que poseen una alta dureza al deslizarse sobre otra superficie de menor resistencia.

⁵ VAN-STRAHLEN, Báez, P., Ballesteros, P. Evaluación del desgaste adhesivo de recubrimientos metálicos duros depositados por procesos de soldadura, con un tribómetro de cilindros cruzados. Revista ION, 22, 17-23 [en línea], 2009 [revisado el 30 de mayo 2018].

Hay dos formas básicas de abrasión: abrasión por desgaste de dos cuerpos (Ver Figura 3a) y abrasión por desgaste de tres cuerpos (ver Figura 3b).

El primero ocurre cuando las protuberancias duras de una superficie son deslizadas contra otra, por otra parte, el desgaste abrasivo de tres cuerpos se presenta en sistemas donde partículas tienen la libertad de deslizarse o girar entre dos superficies, hay que tener en cuenta de que los rangos de desgaste en la abrasión de tres cuerpos son generalmente bajos en comparación al sistema de abrasión de dos cuerpos. ⁶

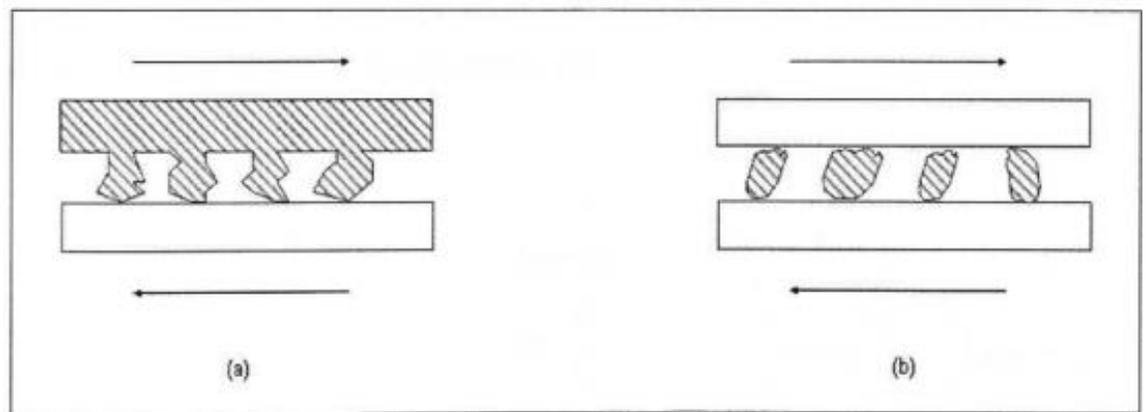


Figura 3. Tipos de abrasión.

Este tipo de desgaste también es causado por partículas abrasivas que son más duras igual de duras a la superficie que se desgasta; entre estas partículas abrasivas se encuentra la arena, polvo, viruta, partículas de pintura y suciedad. A continuación, se muestra una superficie que ha quedado satinada por la acción de partículas abrasivas como arena (Figura 4).

⁶ DEVARAJU, A. A critical review on different types of wear of materials. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 6, 77-83 [en línea], 2015 [revisado el 30 de mayo 2018].



Figura 4. Superficie satinada por causa de partículas abrasivas.

2.2.3. Desgaste corrosivo

El desgaste corrosivo ocurre cuando sustancias químicas entran en contacto con la superficie limpia de los metales formando enlaces fuertes. Cuando los agentes químicos como el oxígeno entran en contacto con superficies que se están deslizando y no poseen una buena lubricación ocurre el desgaste corrosivo por oxidación térmica provocando partículas de óxido.⁷

Este tipo de desgaste hace referencia más a una acción química o electroquímica que una acción propia de desgaste.

La corrosión aparece cuando se dan tres condiciones que son: la zona catódica, zona anódica y un electrolito que une el ánodo con el cátodo y esto da paso a la corriente.

Como los ánodos son más activos que los cátodos químicamente hablando genera picaduras y sufren corrosión a diferencia de los cátodos (Figura 5).

⁷ TRUJANO, Leonal. Coeficientes tribológicos para acero al carbón AISI 1045 y acero aleado AISI 4140 (Tesis de especialización en ingeniería mecánica). Instituto Politécnico Nacional, México [en línea], 2011



Figura 5. Turbocompresor oxidado debido a altas temperaturas.

En un medio húmedo aumentara la velocidad de la corrosión y, si los electrolitos son ácidos, aumenta la velocidad de oxidación debido a que son mejores conductores. Existen varios mecanismos de corrosión, entre ellos:

- corrosión galvánica
- corrosión por erosión
- corrosión por exfoliación
- corrosión por picadura
- corrosión intergranular

2.2.4. Desgaste por fatiga

El desgaste por fatiga es causado por la acción de una carga cíclica o tensiones repetitivas produciendo deformaciones en las capas de la superficie del material debido al contacto entre asperezas siendo el coeficiente de fricción un factor importante (ver Figura 6).

Estas deformaciones generan grietas en el material produciendo grandes rupturas que se pueden observar a simple vista. ⁸



Figura 6. Desgaste por fatiga (tomado de: Luengo-López, 2008 [8])

Otro de los factores que generan este tipo de desgaste es la rodadura la cual hace que se flexione la superficie generando una acción de cizalla en la pieza.

Las grietas empiezan a hacer una inclusión interna y crecen hasta la superficie. Esto hace que grandes trozos de material se separen de la pieza.

A continuación, un ejemplo de desgaste por fatiga en engranaje por acción de carga cíclica (Figura 7).

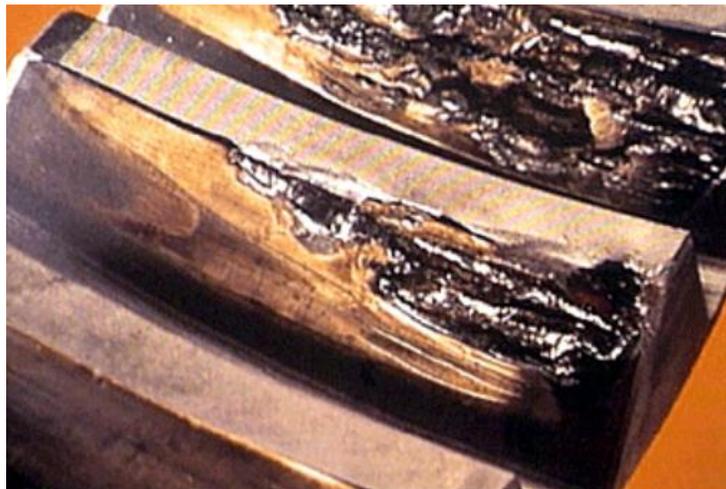


Figura 7. Daño en engranaje por fatiga.

⁸ LUENGO-LÓPEZ, O. Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP (Tesis de pregrado). Escuela Técnica Superior, Barcelona [en línea], 2008.

2.2.5. Desgaste erosivo

El desgaste erosivo ocurre cuando pequeñas partículas de alta dureza que se mueven a alta velocidad chocan contra la superficie de un material generando arañetazos o dando un aspecto mate. Estas partículas por lo general se mueven por la acción de un fluido y tienden a ser más pesadas que el fluido.

Este tipo de desgaste afecta a la industria minera y de alimentos afectando piezas de máquinas como: turbinas, bombas, y piezas usadas en la industria petroquímica (ver Figura 8).



Figura 8. Hélice desgastada por erosión

Este tipo de desgaste actúa en unión con la corrosión cuando el trabajo se da en un medio húmedo. Esta unión da como resultado la degradación acelerada en los materiales.

Los materiales que poseen capas pasivas como aceros inoxidable austeníticos el proceso de desgaste tiende a ser mayor.

En resumen, erosión se caracteriza por la pérdida de material debido a la interacción que ocurre entre una superficie y un fluido, el cual puede contener sólidos en suspensión que pueden ser de origen externo u originados por las partículas del mismo material desgastado.

2.2.6. Desgaste por cavitación

La cavitación es un fenómeno que ocurre cuando se forman burbujas de aire, gas o vapor en un fluido debido a los cambios repentinos de presión o dirección de flujo y estas implotan haciendo que salgan chorros de fluido a altas velocidades y choquen contra la superficie.

Las burbujas de aire se forman porque la presión del fluido baja hasta ser cercano a la presión de vapor para las condiciones termodinámicas del medio, lo que es casi un proceso de ebullición.

El desgaste por cavitación es causado por burbujas de aire que se forman en un fluido y cuando colapsan forman una onda de presión que causa daños de erosión, es decir se producen impactos en los materiales, especialmente esto ocurre en las bombas, las turbinas afectando los álabes (Figura 9), tubos Venturi y demás maquinas hidráulicas.



Figura 9. Álabes de una turbina afectado por la cavitación

La erosión por cavitación realmente se produce por impactos en donde un material se estrella contra la superficie de la pieza, siendo en este caso el fluido el material de impacto.

La cavitación puede ocurrir en fluidos en movimiento y en reposo siendo la condición alcanzar el equilibrio liquido-vapor.

En los fluidos en movimiento ocurre por cambios de presión y aumentos de velocidad, en los líquidos en reposo ocurre por el fenómeno de transferencia de calor el cual hace que se aumente la temperatura y produzca burbujas.⁹

2.2.7. Desgaste erosivo en seco de materiales

El desgaste erosivo en seco de materiales es causado por la acción de un fluido en movimiento a alta velocidad que arrastra partículas abrasivas que chocan contra la superficie de los materiales generando erosión y pérdida de material. El fenómeno ocurre en un medio seco (aire seco) por eso se le da este nombre.

En algunos casos este fenómeno es útil ya que por medio de este efecto se logra por ejemplo la limpieza de equipos, los cuales por medio de la arena disparada a presión se obtienen superficies libres de óxido, un ejemplo de esto es el *sanblasting*.¹⁰

También funciona para dar acabado a las superficies como los son las hojas abrasivas que permiten pulir.

Los aspectos a considerar de un impacto de partículas sólidas son: tamaño, velocidad y dureza de la partícula erosiva, así otro punto a considerar es la dureza de la superficie (Figura 10).

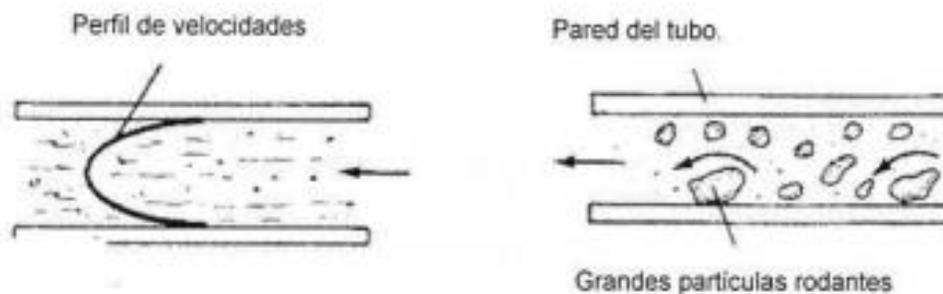


Figura 10. Desgaste erosivo (tomado de RABINOWICZ, 1995 [10]).

⁹ T.Okada and Y. Iwai, Dep. of Mechanical Engineering, Cavitation Erosion”, Fukui University, Japan, December, 1989.

¹⁰Briscoe, B.J., & Adams, M.J. Tribology in particulate Technology. Adam Hilger, 1987.

El ángulo de incidencia sobre la superficie del material tiene que ver mucho en este tipo de desgaste. Cuando el Angulo en que chocan las partículas en la superficie es bajo el desgaste es mayor en materiales que son frágiles, mientras que en materiales dúctiles los ángulos mayores como 90° causan mayor desgaste.

Cuando los ángulos son cercanos a 90° la energía de la partícula se consume en la deformación de la partícula.

Para ángulos de ataques normales como 90° las partículas provocan la perdida por fatiga en la superficie del material, lo que hace que cuando este punto sea alcanzado el desgaste empieza a ser menor.

2.3. RECUBRIMIENTO POR ROCIADO TÉRMICO

Es el proceso por el cual el metal, la cerámica y algunos polímeros en forma de polvo se calientan por medio de una antorcha o soplete, por encima de su punto de fusión.

El material fundido que queda del proceso es proyectado con una corriente de aire o gas contra la superficie que se quiere recubrir. Las partículas o el sustrato se adhieren a la superficie y se solidifican formando la capa de recubrimiento (ver Figura 11).

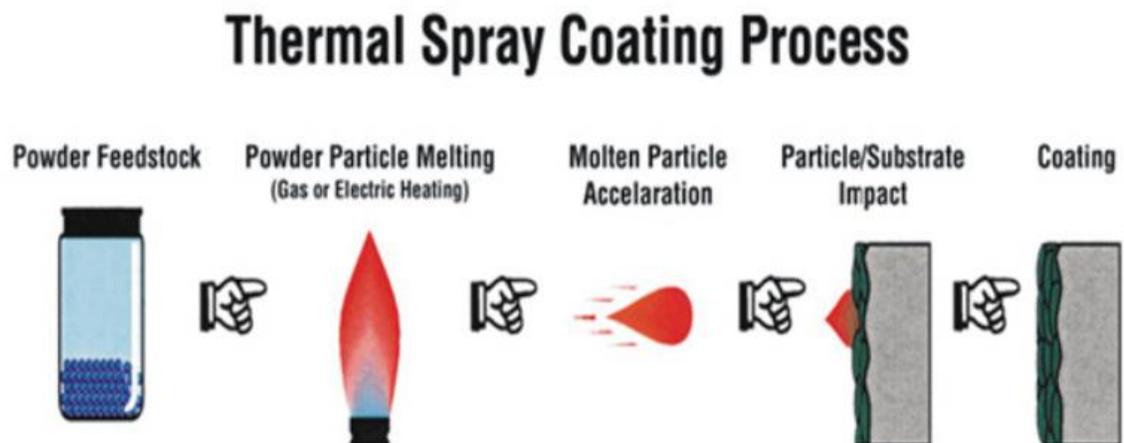


Figura 11. Etapas del recubrimiento por rociado térmico (tomado del catálogo Mirror roller)

Este proceso se usa para añadir capas de un material diferente o igual para la creación de recubrimientos que soporten las exigencias puntuales.

Este tratamiento superficial no afecta el metal sobre el cual se recubre, en la actualidad los procesos de rociado térmico tienen gran aceptación en la industria, tanto en la fabricación de piezas como en el mantenimiento de dichas, en donde este campo de aplicación se extiende y se implica cada vez más debido al desarrollo de nuevas aleaciones y procesos que se le pueden aplicar a los materiales ya que existe gran variedad de productos y capas que se pueden obtener por rociado térmico siendo virtualmente ilimitadas.

Dichas capas pueden ser de diferentes morfologías como metálicas, cerámicas, poliméricas o cualquier combinación deseada para dar un rango algo a las características físicas y dependiendo también del requerimiento técnico para el cual se le vaya aplicar el revestimiento. ^{11 12}

La Figura 12 muestra el principio de funcionamiento del rociado térmico; en donde el material del recubrimiento se derrite por la fuente de calor y este es expulsado por gases hacia la superficie a recubrir y formar una capa sólida.

¹¹ FINNING, Módulo desgaste, Análisis de Fallas I, Finning Sudamérica-CAT [en línea].

¹² MARULANDA-ARÉVALO, J.L., Trisancho-Reyes, J.L., González-Betarcourt, H.A. Rociado térmico. Universidad Tecnológica de Pereira, primera edición, Pereira Colombia, 2015.

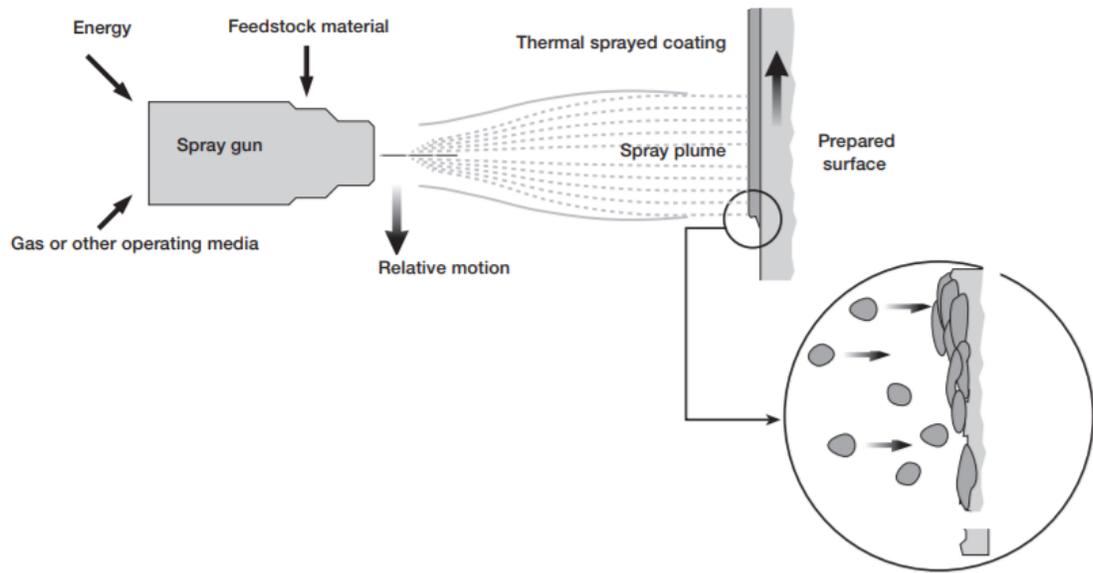


Figura 12. Rociado térmico (tomado de BEGRIFFE, 1994 ¹³)

Los materiales adecuados para hacerles este tipo de recubrimiento son los que posean una alta resistencia al impacto de propulsión de partículas, es decir aproximadamente 55HCR o menor.

Antes de aplicar el recubrimiento se deben emplear técnicas para hacerlo como lo son, limpieza de la superficie; puede ser por hojas abrasivas, ya que el contacto con la superficie es muy importante en este proceso y se necesita que el material penetre muy bien la superficie. El impacto a alta velocidad hace que el material se deforme en la superficie y se extienda sobre ella.¹³ Uno de los usos que más se le da a este tipo de recubrimiento es la protección contra el desgaste.

¹³ DIN EN 657. (1994). Thermal Spray – Begriffe, Einteilung; Beuth-Verlag, Berlin.

2.4 MATERIALES PARA RECUBRIMIENTOS

En teoría cualquier material que no se descomponga o se deforme frente a la fundida sirve como material de recubrimiento. Este material por lo general está en forma de polvo.

Existe una clasificación de materiales que se pueden usar para recubrimiento dependiendo de la aplicación. Los carburos son buenos para la resistencia al desgaste. Como lo indica la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de materiales usados para recubrimiento

Material	Tipo de aleación	Características	Ejemplo de aplicación
Metales puros	Zn	Protege de la corrosión	Construcción de puentes
Aleación auto-fundente	FeNiBSi	Alta dureza, porosidad mínima en el fusionado	Ejes, rodamientos
Acero	Fe 13Cr	Económica, resistencia al desgaste	Reparaciones
MCrAlY	NiCrAlY	Resistencia a la corrosión en alta temperatura	Aspas de turbinas de gas
Níquel-grafito	Ni 25C	Anti-arrugas	Conductos de entrada del compresor
Óxidos	Al ₂ O ₃	Resistencia a la oxidación, alta dureza	Industria textil
Carburos	WC 12Co	Resistencia al desgaste	Ejes

Fuente: SULZER, 2013[14]

2.4.1 Carburo de tungsteno

El carburo de tungsteno o carburo de wolframio WC ha sido un material muy utilizado para hacer recubrimientos que protejan de la erosión y la abrasión, además de ser usado en la fabricación de maquinaria y herramientas de corte como brocas, fresas y buriles gracias a sus propiedades mecánicas que poseen una alta dureza y resistencia a la corrosión ¹⁴.

El recubrimiento del carburo de tungsteno depende de parámetros como: el tiempo de exposición a la llama y composición del gas. Esto puede influir bastante en la composición y las propiedades del recubrimiento (ver Tabla 1).

Tabla 2. Propiedades físicas y composición de materiales de carburo de tungsteno

Propiedades físicas	WCNi6%	WCCo6%	WCCo8%	WCCo11%
Densidad (g/cm ³)	14,5-14,9			
Cod. ISO	-	K10-K20	K30	K40
Dureza (HRA)	90,0	90,5	89,5	86,5
Dureza (HV50)	1590	1600	1400	1200
Resistencia a flexión (MPa)	1550	1800	2200	2500
Coeficiente de dilatación (10 ⁻⁶ /°C)	5,2	5,0	5,0	6,8
Conductividad térmica (W/m K)	60-90			
Temperatura de trabajo (°C)	400			
Composición				
WC (%)	94	94	92	89
Co (%)	-	6	8	11
Ni (%)	6	-	-	-

¹⁴ WANSTRAND, O., Larsson, M., Heden, P. Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings, Surface and Coatings Technology 111, 1999, 247-254.

Fuente: RICHERT, MAZURKIEWICZ & SMOLIK, 2012 [21]).

Un estudio de RICHERT y colaboradores (2012) mostró que los recubrimientos con carburo de tungsteno dan mejores propiedades comparados con otros tipos de recubrimiento. Para el carburo de tungsteno se utilizan diferentes métodos como PVD, CVD y métodos de pulverización térmica.¹⁵

2.5. NORMA ASTM G76-13: MÉTODO DE PRUEBA ESTÁNDAR PARA REALIZAR PRUEBAS DE EROSIÓN POR IMPACTO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS UTILIZANDO CHORROS DE GAS

Esta norma permite determinar la pérdida de material causada por la erosión de partículas sólidas arrastradas por gas o aire provenientes de una boquilla.

Este método de ensayo se puede utilizar en el laboratorio para medir la erosión de partículas sólidas de diferentes materiales y se ha utilizado como una prueba de detección para clasificar las tasas de erosión de partículas sólidas de materiales en entornos de servicio simulado, esta prueba implica tamaños de partículas, velocidades, ángulos de ataque, entornos, y así sucesivamente, que variarán de un amplio intervalo.

Por lo tanto, cualquier prueba de laboratorio puede no ser suficiente para evaluar el rendimiento del servicio esperado.

Además, este método de prueba describe un procedimiento bien caracterizado para la medición de la erosión de impacto de partículas sólidas para el que los resultados de pruebas entre laboratorios están disponibles¹⁶

La norma establece ciertos parámetros para realizar el ensayo, aunque que permite variaciones y desviaciones tanto en el diseño del equipo como en las condiciones en que esta prueba se realiza. Las recomendaciones que establece la norma son:

¹⁵ Richert, M. W., Mazurkiewicz, A., Smolik, J. A. The deposition of WC-Co coatings [en línea], 2012 [revisado el 13 de julio 2018].

¹⁶ NORMA ASTM G76-13 Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets.

- La longitud de la boquilla respecto al diámetro debe ser 25:1.
- La boquilla recomendada consta de 1.5 mm de diámetro interno y 50 mm de longitud.
- El espécimen puede ser de configuración rectangular de 10x30x2 mm de espesor.
- El material utilizado debe ser uniforme.
- El tamaño de la partícula abrasiva recomendada es de 50 μm .
- El aire debe ser nominalmente seco.
- La prueba se realiza a condiciones normales 18° C a 28 °C.
- La presión estimada del sistema debe ser 140 kPa.
- La velocidad de entrada 30 m/s.
- La velocidad de alimentación de las partículas debe ser 0.033 +- 0.008 g/s.
- La distancia del espécimen y la boquilla debe ser 10 \pm 1 mm.

2.5.1. Metodología según la norma ASTM G76-13

Existen diferentes configuraciones para realizar pruebas de desgaste erosivo en seco de materiales y la norma ASTM G76-13 ha definido un esquema estándar como se muestra en la Figura 13:

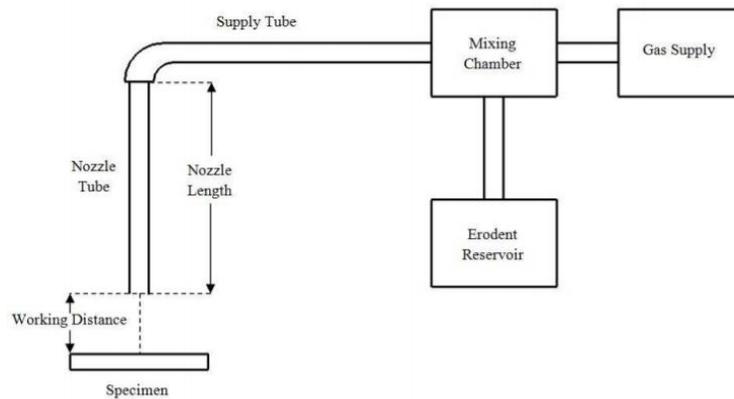


Figura 13. Esquema para el ensayo erosivo en seco según la norma ASTM G 76-13

La norma dicta que el ensayo cuenta con un suministro de aire o gas, una cámara de mezcla, una reserva de material abrasivo y una boquilla.

El aire comprimido pasa a través de un tubo que llega a la cámara de mezclado en donde se suministra el material abrasivo, el aire o gas arrastra el material abrasivo hacia una boquilla que reduce el diámetro y por ende aumenta la velocidad para el impacto. Las partículas chocan contra el espécimen a cierta distancia para producir el desgaste.

La metodología consiste en medir la velocidad de alimentación de la partícula; pesando cierta cantidad de material abrasivo colocarlo en el embudo, dejarlo pasar y contabilizar el tiempo. Se debe medir la velocidad de salida de la boquilla.

Preparar la superficie del espécimen limpiándola y logrando una uniformidad y proceder a pesar la muestra antes de realizar el ensayo.

Montar la muestra en la porta probeta en la correcta posición y proceder a realizar el ensayo, retirar la muestra y pesarla para hacer la prueba otra vez. Repetir el procedimiento hasta lograr al menos 10 minutos de prueba en cada muestra.

Medir la tasa de erosión a partir de la pendiente de la masa perdida en el tiempo.

Repetir este proceso al menos 10 veces.

2.6. EQUIPOS QUE SE UTILIZAN EN EL ENSAYO

2.6.1. Medidor Venturi

El medidor Venturi es un dispositivo creado por Giovanni Battista Venturi en el año 1797 tras descubrir el efecto Venturi, el cual consiste en reducir el diámetro de un conducto para reducir su presión y aumentar la velocidad y luego aumentar su área de nuevo para crear vacío en la garganta del conducto.

El dispositivo tiene una configuración especial en donde el área inicial se va reduciendo gradualmente a un ángulo hasta llegar a un área más pequeña generando una garganta y luego aumentar el área pequeña hasta el área inicial a un ángulo más pequeño que el de reducción (ver Figura 14), esto con el fin de acelerar un fluido.

Este dispositivo está catalogado como un medidor de flujo el cual permite medir la velocidad de un fluido indirectamente, por medio de la diferencia de presiones entre el punto 1 y el punto 2 gracias a dos tuberías instaladas conectadas entre sí con un fluido en medio como puede ser el mercurio.

La altura h me da la diferencia de presión que existe entre los puntos y por medio de la ecuación de Bernoulli se puede calcular la velocidad y por ende el caudal.¹⁷

¹⁷ PÉREZ, S. F. Renedo, E. C. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Licencia Creative Commons. Universidad de Cantabria [en línea], 2009 [revisado en 13 de julio 2018].

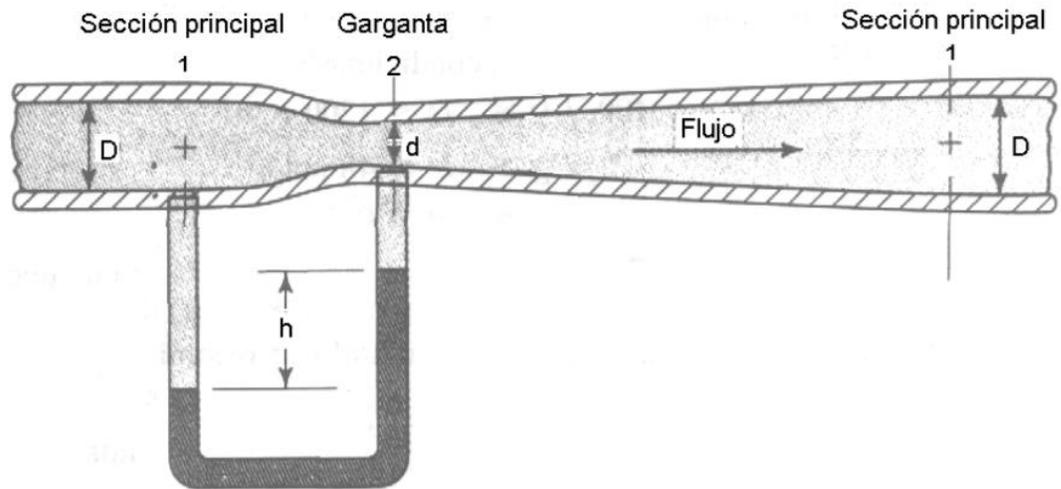


Figura 14. Tubo Venturi (tomado de PÉREZ y RENEDO, 2013 [12])

La función del tubo Venturi en el ensayo abrasivo en seco es crear el vacío para absorber las partículas abrasivas y que estas lleguen a la garganta para ser arrastradas hasta chocar con la superficie del espécimen.

El medidor Venturi tiene bastantes aplicaciones entre ellas los vehículos que tienen carburador, allí se encuentra un Venturi que tiene como función la mezcla de los rocíos de agua de alta presión.

2.6.2. Función de la tolva

La tolva es un dispositivo que tiene un funcionamiento parecido al de un embudo que trabaja como canalizador de materiales granulares. La forma de la tolva es una sección cónica de tal forma que la carga se efectúa en la parte superior para descargarse en la parte inferior (Figura 15) ¹⁸

En este ensayo la tolva va realizar la función de ser la alimentación del material abrasivo, depositándose en ella para ser absorbida por el vacío del efecto Venturi y controlar el flujo alimentación con una válvula de paso 1.

¹⁸ AMORÓS, J. L., Mallol, G., Sánchez, E., García, J. Diseño de silos y tolvas para el almacenamiento de materiales pulvulentos [en línea], 2000. Universitat Jaume I, Castellón.



Figura 15. Embudo o tolva

2.6.3 Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido (SEM por sus siglas en inglés) es un instrumento que permite la observación y caracterización de superficies de materiales orgánicos e inorgánicos dando información morfológica de los materiales analizados. Consiste en enfocar sobre una muestra electro densa (opaca a los electrones) un fino haz de electrones acelerado con excitación desde 0.1 kV a 30 Kv (Figura 16).

El haz de electrones se desplaza sobre la superficie de la muestra realizando un barrido que obedece a una trayectoria de a líneas paralelas. La variación morfológica entrega diversas señales que son recogidas por distintos receptores; los cuales permiten la observación, caracterización y micro análisis superficial de materiales orgánicos e inorgánicos ¹⁹

Un microscopio electrónico de barrido funciona con un haz de electrones producido por un cañón termoiónico o de emisión de campo FEG. Al cañón se le aplica un potencial eléctrico que acelera el haz de electrones hacia la columna, este es focalizado por medio de lentes electromagnéticas sobre la muestra. La amplificación de imagen se produce por un conjunto de lentes electromagnéticas que mediante

¹⁹ GOODHEW, P. J., Humphreys, F. J., Beanland, R. Electron microscopy and Analysis, Taylor & Francis: London. 2° Ed,1988.

un tratamiento adecuado de ñas señales electrónicas son proyectadas en un tubo de rayos catódicos CRT.



Figura 16. Microscopio electrónico de barrido (tomado de GOODHEW, HUMPHREYS & BEANLAND, 1988 [22])

3. DISEÑO DEL EQUIPO

3.1. DISEÑO DE LA LÍNEA DE AIRE

El diseño de la línea de aire fue basado en el siguiente esquema de la Figura 17.

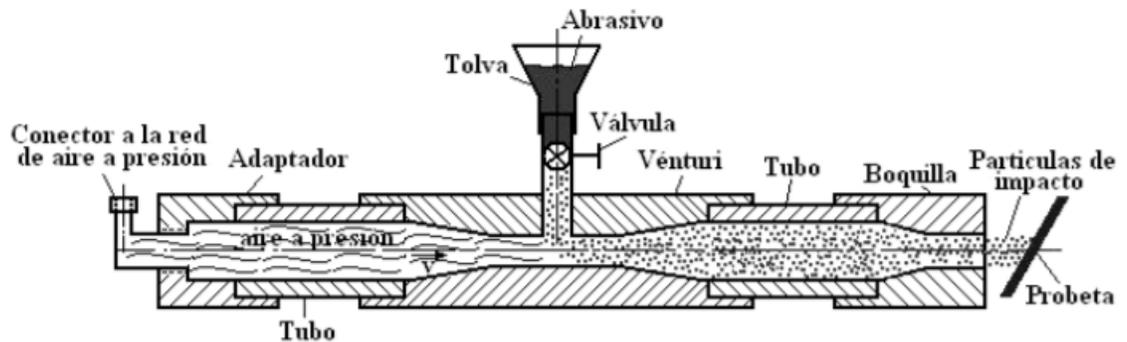


Figura 17. Línea de presión (tomado de GARCÍA, MEJÍA y MESA, 2004 [23])

El sistema muestra una conexión a la red de aire a presión que viene de un compresor y llega a un adaptador. En nuestro caso el adaptador está hecho en galvanizado (ver Anexo A) y fue diseñado para aumentar el diámetro de salida de la manguera a la entrada de un tubo de dimensiones comerciales fabricado en acero inoxidable 304.

3.2. DISEÑO DEL TUBO VENTURI

El tubo Venturi en este equipo es importante porque es el elemento que va a hacer de cámara de mezclado, como hemos hablado anteriormente, el Venturi genera un vacío, el cual es capaz de absorber las partículas a la línea de aire para ser arrastradas por este (ver Figura 18).

Para el diseño del tubo Venturi se estableció el diámetro de entrada y el diámetro interno basados en modelos que ya se han realizados para este tipo de ensayo: $D1=20$ mm y $D2=12$ mm.

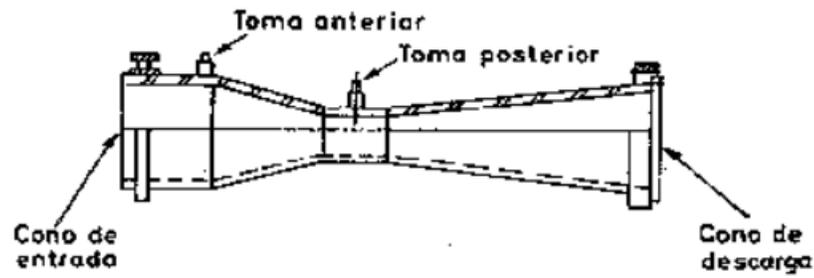


Figura 18. Medidor de flujo Venturi (tomado de BOLÍVAR, 2012 [24])

Con la ecuación de continuidad se calculó la caída de presión:

$$(P1 - P2) = \frac{\left(\frac{v1}{C}\right)^2 [(A1/A2)^2 - 1]}{2g/\gamma}$$

Relación de diámetros:

$B = D2/D1 = 0,6$, para este valor se asume $C=0,998$ por tabla.

$\gamma =$ Peso específico del aire seco a $25\text{ }^\circ\text{C}$. $\gamma=11,53754\text{ kg/m}^2\text{s}^2$, en donde la densidad del aire seco fue tomada como $1,1773\text{ kg/m}^3$.

$P1 = 133\text{ kPa}$.

$(P1-P2) = 3,5\text{ kPa}$

Con el resultado del diferencial de presión se puede estimar el valor de $P2$, en este caso:

$P2 = 133\text{ kPa} - 3,5\text{ kPa} = 129,5\text{ kPa}$

Es decir, que en este caso el fluido se comporta como incompresible ya que no excede velocidades por encima de 100 m/s y su caída de presión es relativamente baja por esta razón es correcto usar esta ecuación.

Para el cálculo de la velocidad en la garganta fue usada la siguiente ecuación:

$$v2 = A1 \sqrt{\frac{2(P1 - P2)}{(A1^2 - A2^2)\rho}}$$

$$v_2 = 83,5 \text{ m/s}$$

Una vez obtenidos los cálculos del diseño se utilizó una varilla que se encontraba disponible en acero inoxidable 304, la cual cumple con las condiciones de trabajo en erosión ya que el material debe ser de alta dureza, con dimensiones de diámetro 1+1/4" y longitud de 20 cm, por lo que se procedió a maquinarse en el torno.

Para ensamblar el tubo Venturi al sistema se decidió realizar roscas (Figura 19), lo que era más económico y rápido que la soldadura. Los valores de diámetros fueron modificados debido a que las roscas tenían medidas estándares comerciales.

Los diámetros usados fueron $D_1 = 21.7 \text{ mm}$ y $D_2 = 12,5 \text{ mm}$, con estos valores los resultados fueron:

$$(P_1 - P_2) = 4,3 \text{ kPa} \text{ y } V_2 = 90,6 \text{ m/s}$$

Los ángulos de convergencia y divergencia fueron $20^\circ \pm 1^\circ$ y 6° , respectivamente (ver Anexo C).

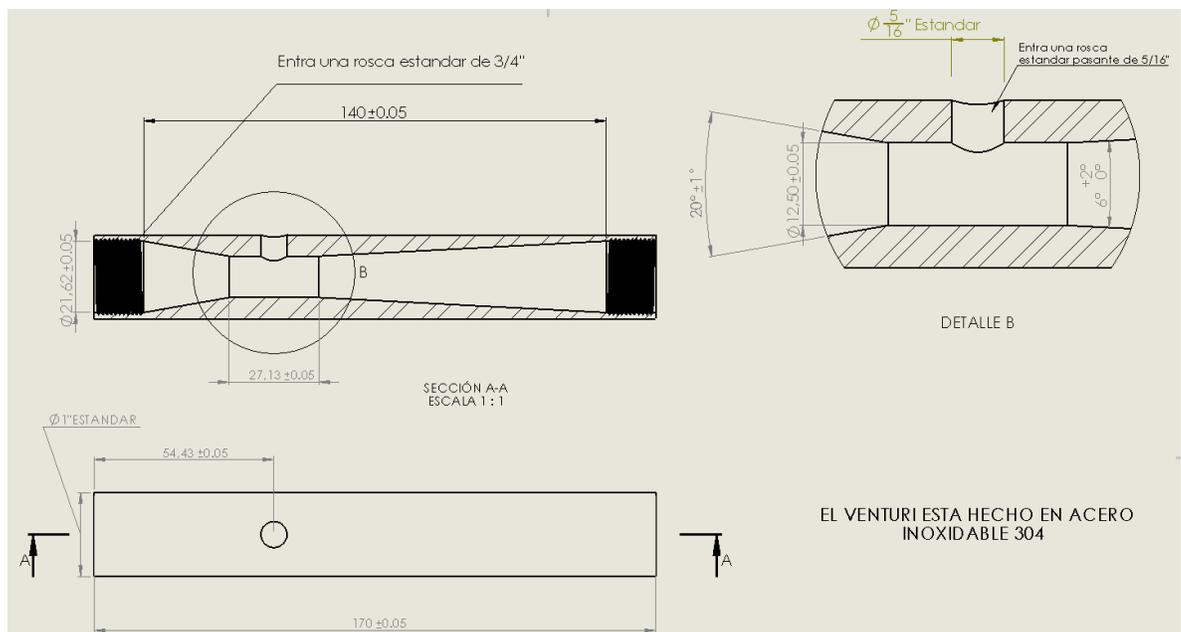


Figura 19. Planos Venturi

3.3. DISEÑO DE LA BOQUILLA

La boquilla al igual que el tubo Venturi se fabricó en acero inoxidable para que aguantara la erosión y se maquinó en el torno. Se tomó como valor inicial el diámetro de salida como 13 mm y longitud 163 mm, con el fin de poder visualizar el área erosionada, siendo $D_2 = 13$ mm y $D_1 = 21,7$ mm.

El diseño de la boquilla se realizó de manera similar al del Venturi, ya que se partió de la analogía hecha anteriormente con el Venturi que constituye de una tobera divergente convergente, por lo que la boquilla puede convergente o divergente lo que hace que se tenga el mismo principio ya sea para aumentar o disminuir la velocidad y en nuestro caso el objetivo fue aumentar la velocidad para el impacto (ver Figura 20).

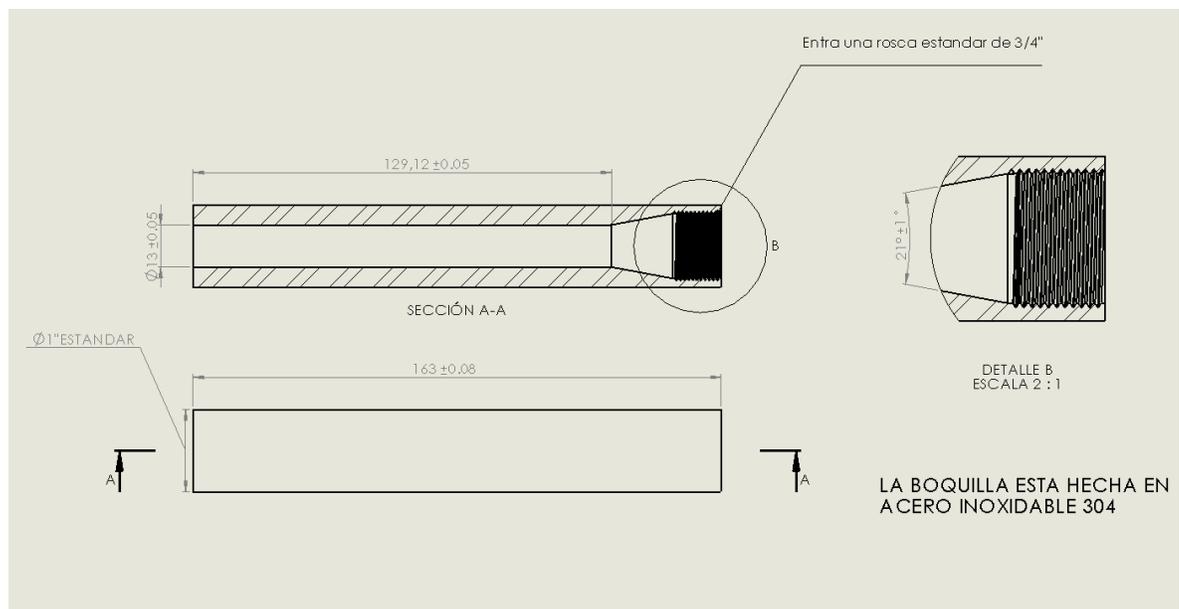


Figura 20. Planos boquilla

3.4. DISEÑO DE LA PORTA-PROBETA

Para el diseño de la porta-probeta, primero se tuvo en cuenta las dimensiones de las probetas, las cuales en este caso debían ser de dimensiones rectangulares 40x70x3 mm y considerando la norma de libertades a la hora de escoger la

dimensión de las probetas o muestras, lo realmente importante es que fuera capaz de coger la muestra y sostenerla durante el ensayo.

Para la fabricación de la porta-probeta se tomó una barra de hierro que se encontraba disponible en el laboratorio de 1 metro de largo y 8 cm de ancho. Se procedió a cortarla de 50 cm para luego ser doblada en forma de U como se ilustra en el esquema simulado de la Figura 21.



Figura 21. Porta-probeta

Luego con el material restante se cortó una de 30 cm y se dobló con el fin de que encajara la una en la otra, así como que se sujetaran por medio de tornillos como se muestra en la figura 22:



Figura 22. Porta-probeta ensamblado.

3.5. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

El diseño de la estructura se realizó en madera debido a la facilidad de construcción, disponibilidad del material y para disminuir costos.

La estructura fue diseñada para sostener el tubo Venturi y está conectado a la cámara en donde se va a poner la porta-probeta con las probetas e irá alojar el material abrasivo, es decir que la porta-probeta estará dentro de una caja en donde quedará atrapado el material abrasivo, en este caso arena.

Con este fin se definieron las dimensiones de la caja, las cuales fueron 40X40X40 cm. La caja tapada por todos los lados tiene una pequeña porción diseñada para que el aire salga. También cuenta con dos caras de acrílico para poder visualizar la posición de la probeta con respecto a la boquilla y una de estas caras posee una bisagra para poder abrir, cerrar y cambiar la probeta (ver Figura 23).

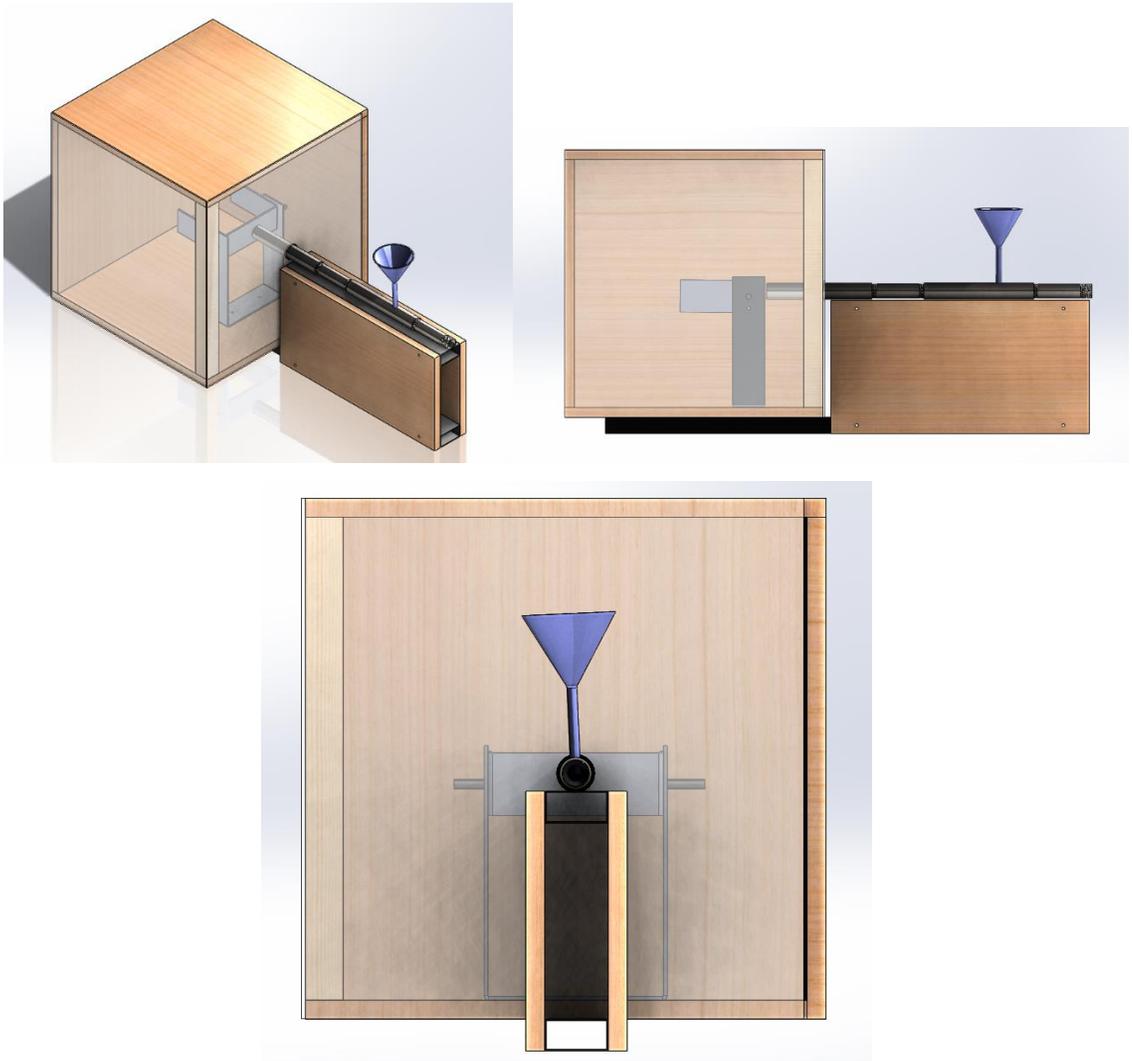


Figura 23. Prototipo realizado en *solidworks*,

4. RESULTADOS DEL EQUIPO

4.1. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO EN SECO DE MATERIALES

Para la construcción se utilizó madera, una tubería rectangular de 1x2", tornillos de 3/16", dos bisagras, dos pedazos de acrílico de 40x41 cm y se realizó el ensamble del tubo Venturi con la boquilla y la toma de aire.

Se tomaron palos de maderas para hacer la estructura y se unieron a las tablas por medio de tornillos (ver Figura 24 y Figura 25).

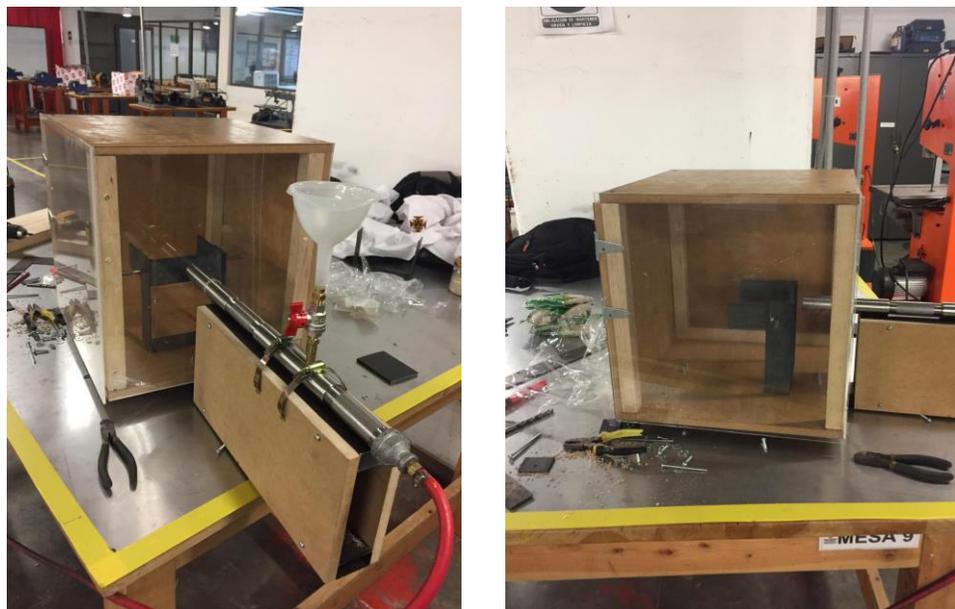


Figura 24. Proceso de construcción del prototipo.

En la Figura 24 se puede observar que 70 cm de tubería rectangular sostienen la caja con la base donde se sostiene el tubo Venturi asegurado con 4 tornillos.

La alimentación del material abrasivo fue preparada con un embudo que se encontraba disponible y que se ensambló perfectamente en la máquina, por lo que

finalmente se incorporó en el prototipo. Es un embudo de plástico para cocina (ver Anexo E).



Figura 25. Prototipo ensamblado (vista total y vista parcial).

4.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL EQUIPO

Para el correcto desarrollo de la prueba se ajustó inicialmente el equipo y se definieron las variables antes de empezar, esto con el fin de caracterizar las condiciones en la que éstas se realizaron y compararlas con las de la norma de interés y las hechas anteriormente en otros estudios.

4.2.1. Calibración del equipo

Ajuste de la velocidad:

Para el desarrollo de la prueba primero se definieron algunas variables como la velocidad inicial medida con un instrumento llamado anemómetro; el cual mide la velocidad del aire y la temperatura del medio.

En seguida, para medir la velocidad de salida de la boquilla, es decir, de impacto en la probeta, se abrió la llave que permite la salida del aire comprimido gradualmente y se fue acercando el instrumento de medición que iba marcando la velocidad (ver Figura 26).

La idea era que el instrumento midiera una velocidad de 30 m/s, pero debido a las especificaciones del instrumento, éste no debe exceder 30 m/s porque puede fallar. Por esta razón, no se pudo abrir la llave del todo, ni se pudo acercar el instrumento a ras de la boquilla, entonces se definió que la velocidad de la partícula a 1 cm de la boquilla fue aproximadamente de 25 m/s.



Figura 26. Medición de la velocidad de salida de la boquilla

Preparación de la arena:

El tamaño de grano fue fundamental a la hora de realizar la prueba de desgaste erosivo, ya que dependiendo de él se puede generar más pérdida de masa en cuanto éste aumenta de tamaño. Tamaños menores a 100 μm representan una tasa muy baja de desgaste.

La arena que se utilizó fue una arena de decoración de tamaños que oscilan entre 75 μm y 400 μm . El laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana no cuenta con tamizaje de 50 μm como lo especifica la norma, el mínimo disponible fue de 200

μm . De este modo, se realizó el tamizaje de la arena a $200\ \mu\text{m}$, que da tamaños desde $75\ \mu\text{m}$ a $200\ \mu\text{m}$ (ver Figura 27).



Figure 27. Tamizaje de arena en tamaño de $200\ \mu\text{m}$.

Este proceso se realizó 3 veces, cada vez con la misma arena tamizada. Una vez terminado el proceso de tamizaje de la arena, se le realizó un análisis en el microscopio electrónico de barrido para verificar el tamaño de las partículas así obtenidas. Analizando la micrografía de la Figura 28, fue posible confirmar que los granos de arena presentan un tamaño promedio menor que $200\ \mu\text{m}$, ya que presentaron tamaños entre 100 a $136\ \mu\text{m}$, concordando con el requisito que dicta la norma.

Adicionalmente, fue realizado un análisis de la composición química del material abrasivo de la probeta usando un espectrofotómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS por sus siglas en inglés). Es posible ver en la Figura 29 que esta técnica de microscopía electrónica de barrido con microanálisis EDS permitió comprobar que

la composición del material fue de principalmente sílice, ya que se evidenció la presencia de los elementos silicio, carbono y oxígeno.

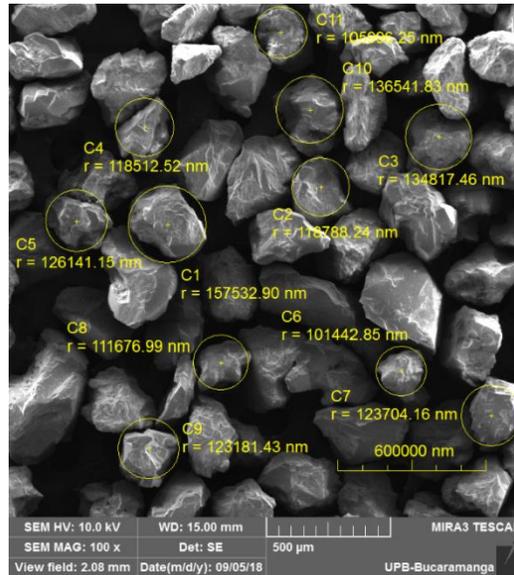


Figure 28. Micrografía de la arena después del proceso de tamizaje.

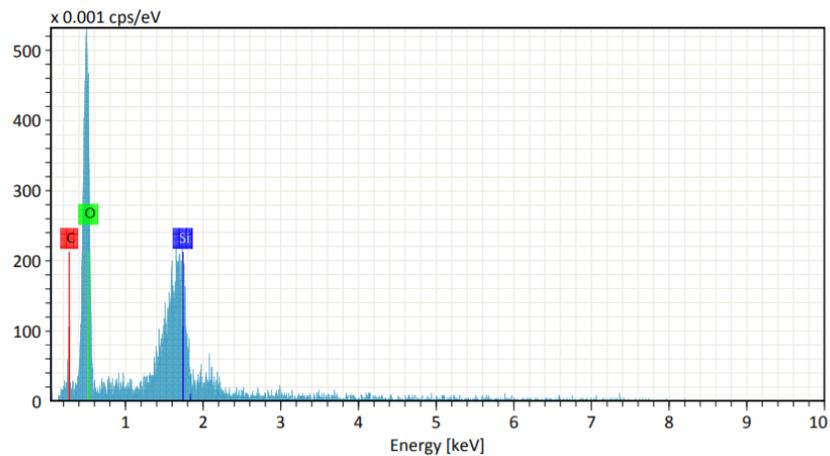


Figure 29. Espectro EDS usado para determinar la composición química de la arena.

Después, la arena tamizada se vertió en el embudo para medir la velocidad de alimentación de partículas abrasivas y en seguida se abrió la llave del aire comprimido al punto del cual dio la velocidad de 25 m/s y se empezó a abrir la

válvula gradualmente, hasta que el vacío empezara a absorber las partículas. Entonces se introdujeron 500 g de arena y se contabilizó el tiempo en el que pasó toda la arena, el tiempo fue aproximadamente de 20 min. Es decir, que el flujo de partículas fue aproximadamente de 0,4116 g/s.

Preparación de las probetas:

Las probetas fueron construidas de acero AISI 1020 y fueron cortadas con las dimensiones mencionadas anteriormente (ver Anexo E del resultado final).

En total se cortaron 20 probetas, 10 para hacer recubrimiento y 10 para probar el equipo. Se pesaron las probetas en la balanza analítica de 4 cifras significativas y se definió su masa antes de la prueba. Las probetas fueron marcadas con el fin de no confundirlas.

4.3. PROCEDIMIENTO PARA LA EJECUCIÓN DE LA PRUEBA DE DESGASTE

Una vez definidas las variables y el calibrado del equipo, se dio inicio a las pruebas siguiendo el procedimiento a continuación:

- a.** Se introduce la primera probeta en el porta muestras y se aseguró con un imán, el cual se sujeta con gran fuerza (ver anexo E).
- b.** Luego se abre la llave del aire comprimido y a seguir la válvula de alimentación de partículas, mientras al mismo tiempo se inicia el conteo.
- c.** A cada probeta se le realizó un total de 5 pruebas en intervalos de tiempo de 120s, 240s, 360s, 480s y 600s.
- d.** Después de cada intervalo de tiempo se pesa la probeta para observar la pérdida de masa que se obtiene y también se observa por el microscopio electrónico de barrido SEM para mirar el daño causado en la superficie del material.
- e.** Una vez terminada las pruebas se procedía a realizar el ensayo de las probetas que se recubrieron con carburo de tungsteno y se repetía el mismo procedimiento.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS

5.1. ANÁLISIS CUANTITATIVO

Inicialmente se muestran los resultados de la pérdida de peso en las probetas ensayadas tras las pruebas de desgaste (ver Figura 30) y luego se realizó la proyección gráfica del total de masa perdida como función del tiempo, para así obtener y comparar el perfil de desgaste erosivo (ver Figura 31).

Tabla 3. Valores Promedios de las pruebas sin recubrimiento y con recubrimiento

Tiempo (s)	AISI 1020	AISI 1020 WC
0	0	0
120	47,580	16,4547
240	80,603	32,3747
360	121,077	45,8013
480	148,777	58,7713
600	160,700	65,4613

Fuente: Autores



Figura 30. Perfil de desgaste erosivo para las probetas en función del tiempo

Los resultados obtenidos fueron comparados con los resultados de otro estudio realizado ²⁰. A seguir, en la Figura 30 se muestra el perfil de desgaste erosivo de un

²⁰ GARCÍA, V. J., Mejía, J. E., Mesa, D. H. Estudio de la resistencia al desgaste erosivo en seco de materiales en ingeniería. Dyna, 71, 2004,

estudio anterior, el cual será usado para comparar el comportamiento de los materiales de las probetas testadas.

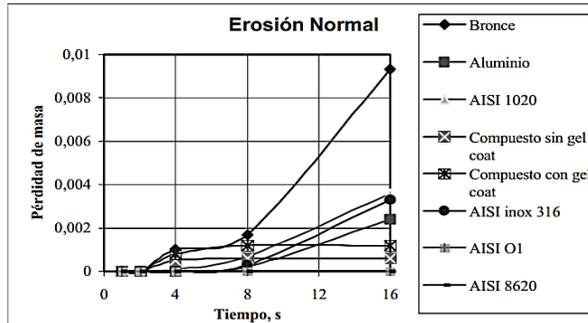


Figura 31. Perfil de desgaste erosivo para diferentes materiales en función del tiempo (tomado de GARCÍA, MEJÍA y MESA, 2004 ²¹).

La Figura 31 de la literatura fue realizada con acero al carbono AISI 1020 en estado recocido para obtener una curva de tendencia y ver su comportamiento aproximado. Para fines de comparación fueron calculados los parámetros de desgaste usando la siguiente ecuación:

$$P = \frac{\Delta m}{t}$$

Donde Δm : diferencia de masa inicial y masa final después de la prueba (pérdida de masa)

t: tiempo total de la prueba.

Datos ya reportados en la literatura para AISI 1020:

$P = 2,19 \times 10^{-4}$ para 16 s, $1,9 \times 10^{-4}$ para 12 s, $2,9 \times 10^{-4}$ para 120 s, $2,94 \times 10^{-4}$ para 240 s, $2,97 \times 10^{-4}$ para 340 s, $2,97 \times 10^{-4}$ para 480 s y $2,98 \times 10^{-4}$ para 600 s.

Datos obtenidos en este estudio para AISI 1020 sin recubrimiento:

$P = 9,7 \times 10^{-4}$ para 16 s, $1,2 \times 10^{-3}$ para 12 s, $3,6 \times 10^{-4}$ para 120 s, $3,2 \times 10^{-4}$ para 240s, $3,04 \times 10^{-4}$ para 360 s, $2,96 \times 10^{-4}$ para 480 s y $2,92 \times 10^{-4}$ para 600 s.

Observando los datos obtenidos fue posible comprobar que el funcionamiento del equipo construido para determinar erosión normal es el adecuado, ya que la

²¹ BOLÍVAR, J. B. Instrumentación Industrial [en línea], 2012 [revisado en 30 de mayo 2018].

variación de estos datos por comparación fue de menos del 10%, siendo 20 % de variación el límite máximo aceptado.

A continuación, se ilustra los resultados de la gráfica de la prueba con recubrimiento. Ver Figura 32.



Figura 32. Perfil de desgaste erosivo para las probetas con recubrimiento en función del tiempo.

Los datos obtenidos en la prueba con recubrimiento comparados con los ensayos sin recubrimiento se puede notar una disminución importante en la pérdida de masa de aproximadamente 37%.

Datos obtenidos en este estudio para AISI 1020 sin recubrimiento:

$P = 3.66 \times 10^{-4}$ para 120 s y 3.041×10^{-4} para 360 s

Datos obtenidos en este estudio par AISI 1020 con recubrimiento:

$P = 1.37 \times 10^{-4}$ para 120 s y 1.19×10^{-4} para 360 s

5.2. ANÁLISIS CUALITATIVO

El aspecto visual de las probetas antes y después de la prueba de desgaste erosivo se presenta a continuación, en las cuales no fue posible apreciar algún cambio superficial a simple vista (Figura 33 y 34), por lo que se procedió a examinar ambos materiales (con y sin recubrimiento) por microscopia electrónica de barrido (SEM).

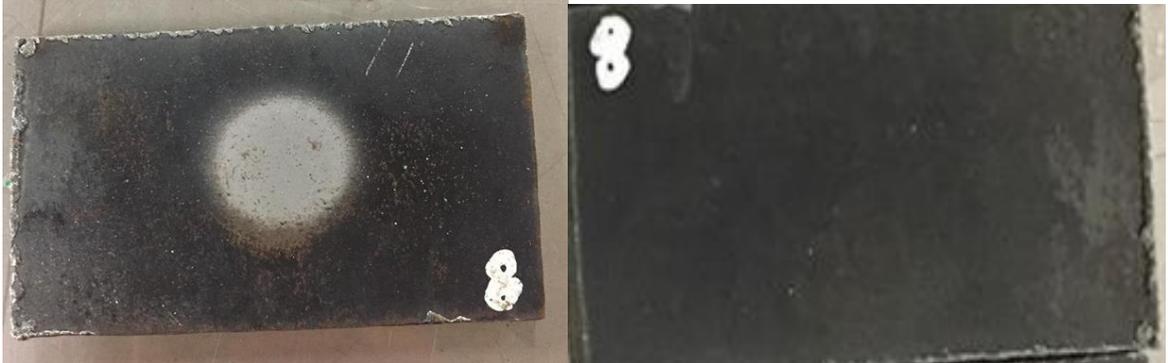


Figura 33. Foto de la probeta AISI 1020 antes y después de la prueba.

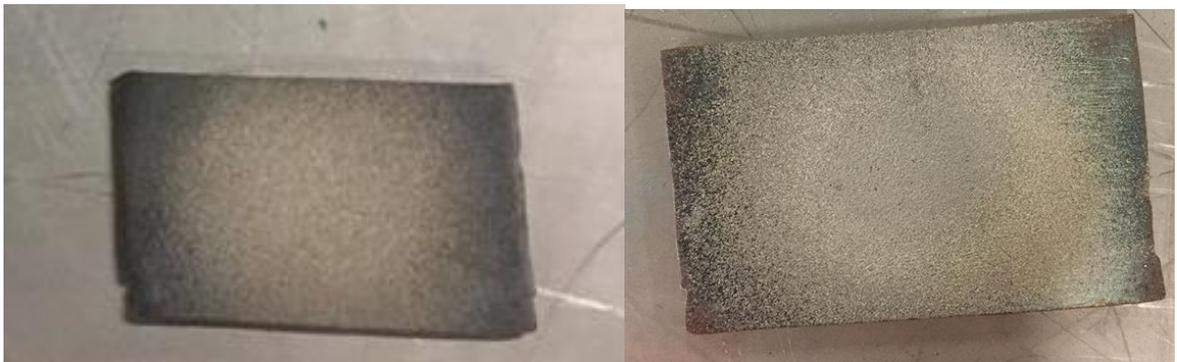


Figura 34. Foto de la probeta AISI 1020 con recubrimiento antes y después de la prueba.

5.2.1. Micrografías de la probeta sin recubrimiento

Inicialmente son presentadas las micrografías del material antes de las pruebas de desgaste erosivo. Las imágenes de la Figura 35 muestran un material con pequeños

poros en la escala micrométrica y que presenta morfología porosa uniforme en ambos casos de aumento.

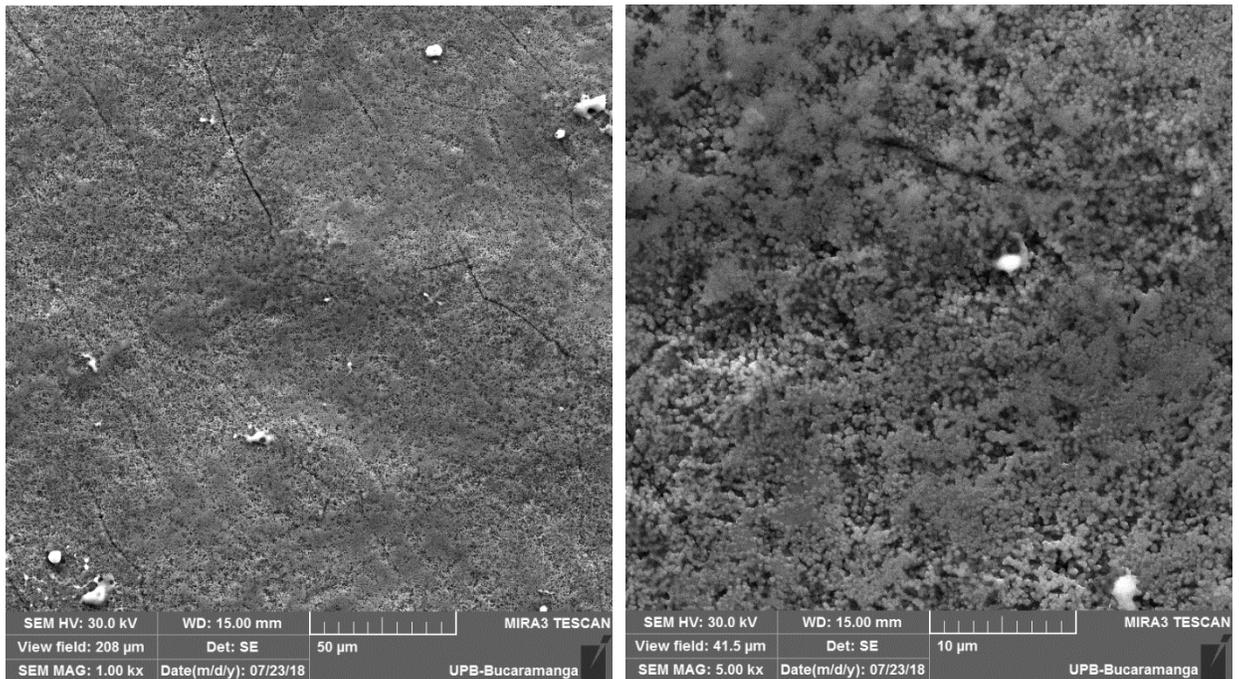


Figura 35. Micrografías de la probeta sin recubrimiento antes de las pruebas de desgaste: a la izquierda imagen tomada con 1000x y a la derecha imagen tomada con 5000x.

En la Figura 36 es posible ver las imágenes del material resultante después de aplicar las pruebas de desgaste erosivo, siendo inicialmente presentado el material luego de la primera prueba, después el material luego de la tercera prueba y finalmente el material luego de la quinta y última prueba de desgaste. Se observa además las marcas típicas del material impactado donde se aprecian marcas de fractura frágil y este efecto se ve más pronunciado conforme fueron aplicadas más pruebas de desgaste, siendo además evidentes impactos rasantes que se

identifican por cortes con formación de proas ²¹ después de haber realizado las 5 - 2 pruebas.

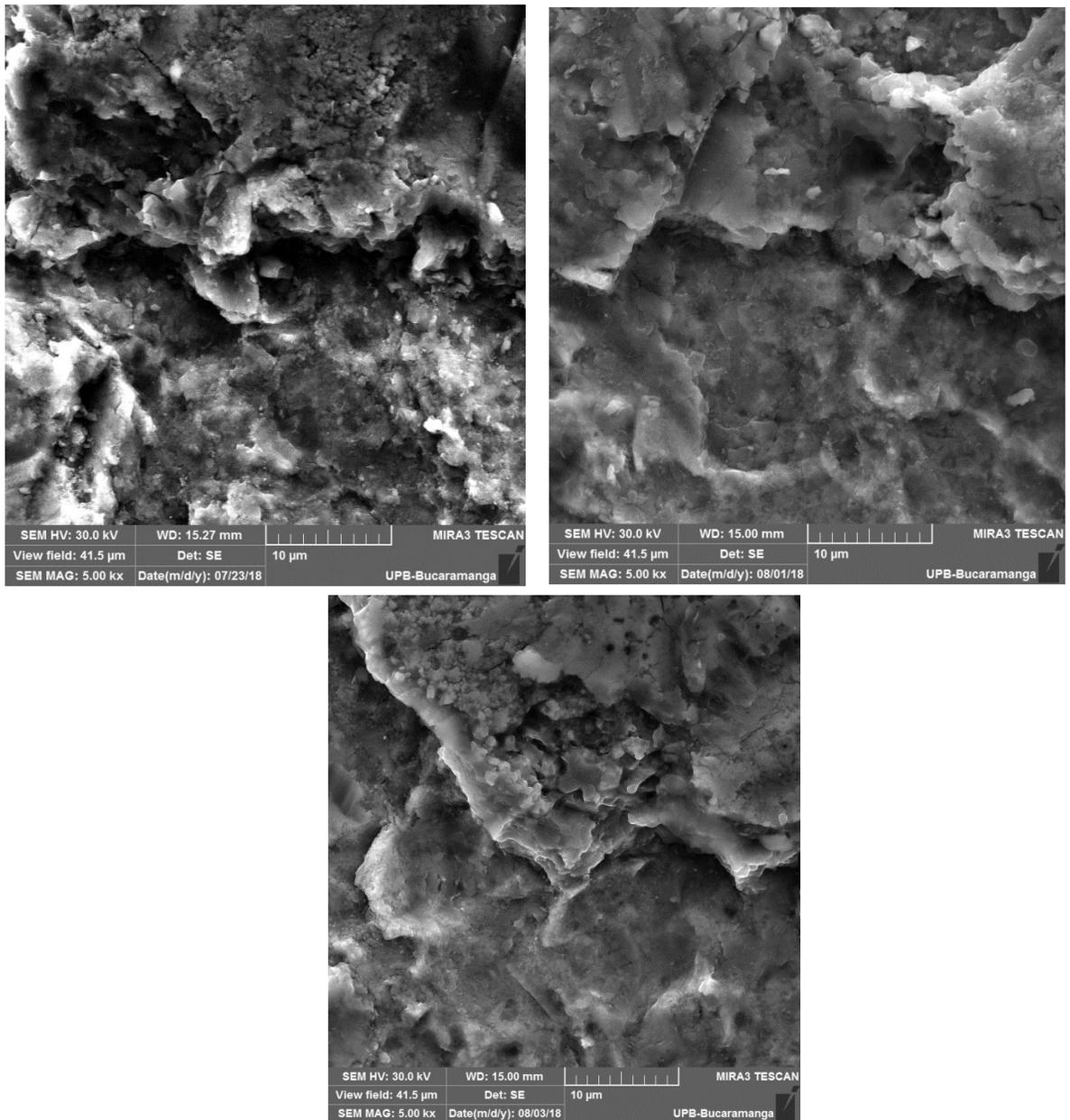


Figura 36. Micrografías de la probeta sin recubrimiento después de las pruebas de desgaste: arriba a la izquierda: después de la primera prueba, arriba a la derecha: después de la tercera prueba y abajo: después de la quinta prueba. Todas las imágenes fueron tomadas a 5000x.

5.2.2. Micrografías de la probeta con recubrimiento

En la Figura 37 se muestran las imágenes de la probeta con recubrimiento de carburo de tungsteno antes de realizar las pruebas de desgaste. Es posible observar el material del recubrimiento que se diferencia del material sin recubrimiento por la presencia de aglomerados cuasi-esféricos y donde no se ve el material poroso característico del acero, por lo que podría decirse que el recubrimiento fue un proceso completo en toda la superficie del acero.

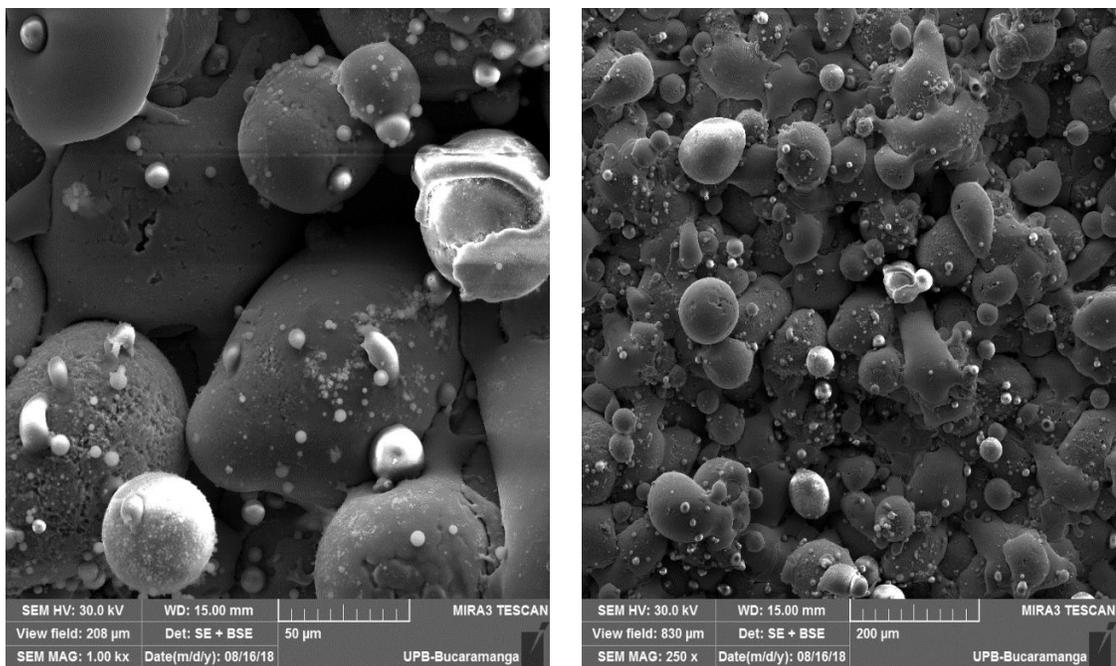


Figura 37. Micrografías de la probeta con recubrimiento antes de las pruebas de desgaste: a la izquierda imagen tomada con 1000x y a la derecha imagen tomada con 250x.

En la Figura 38 ya se observa el material con recubrimiento después de las pruebas, vemos como se evidencia una mayor cantidad de fracturas y cortes conforme aumenta el número de pruebas, para finalmente observar un material con fracturas de mayor dimensión después de haber pasado por 5 pruebas y el corte también fue mayor en este caso.

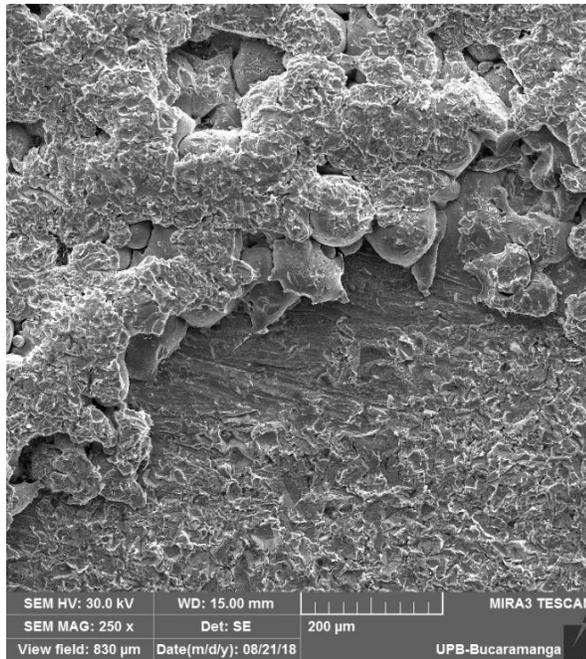
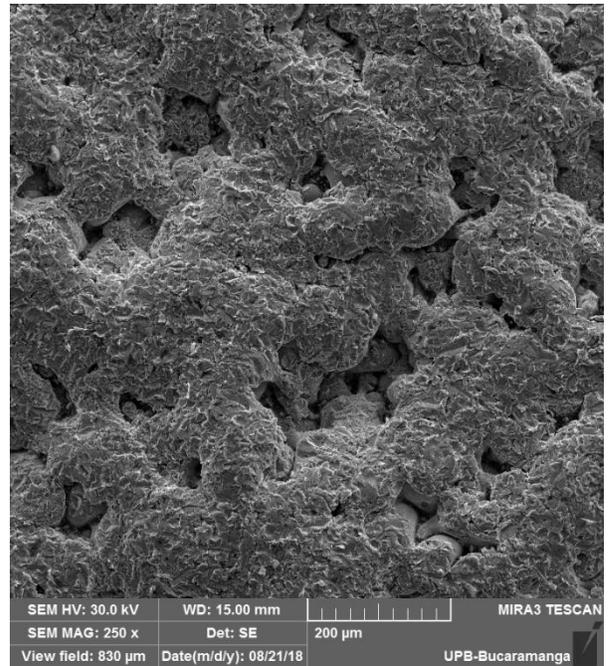
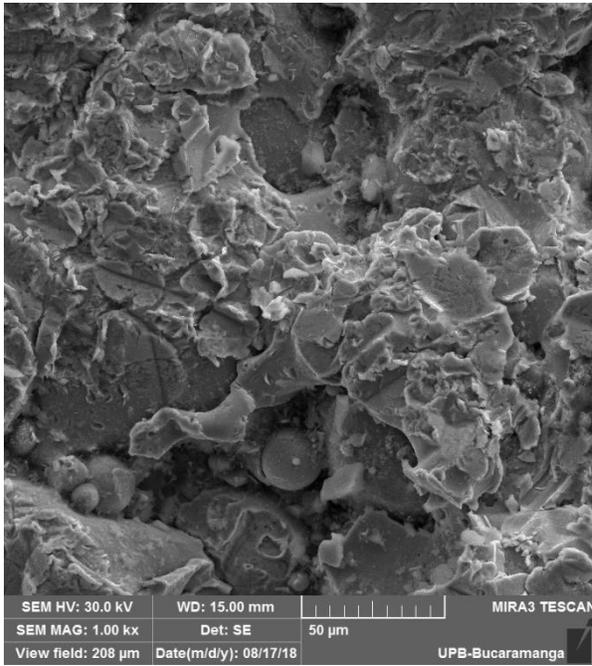


Figura 38. Micrografías de la probeta con recubrimiento después de las pruebas de desgaste: arriba a la izquierda: después de la primera prueba tomada a 1000x, arriba a la derecha: después de la tercera prueba tomada a 250x y abajo: después de la quinta prueba tomada a 250x.

6. CONCLUSIONES

- Con base a la Norma ASTM G76/13 se logró construir un equipo capaz de erosionar superficies para la determinación a la resistencia al desgaste erosivo en seco.
- De la prueba podemos concluir que los resultados mostraron que el equipo está capacitado para realizar pruebas de desgaste debido a que solo excedieron el 6.05% de los datos mostrados en la literatura.
- El recubrimiento ayudó a reducir la pérdida de material en el tiempo aproximadamente en un 60% gracias a las propiedades de alta dureza del carburo de tungsteno.
- Las variaciones en los parámetros como el tamaño de grano de la arena influyeron en que los resultados se alejaran un poco de lo informado en la literatura.

7. RECOMENDACIONES

- Realizar cambios en la estructura del material; pasar de madera a metal, para mejoras de estética y posibles fugas.
- Buscar un tamiz que me permita tener tamaños de grano de 50 μm .
- Diseñar un sistema de banda en la alimentación del material para tener un flujo menor de partículas abrasivas.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SINATORA, Amilton. "Notas de clase de la disciplina, Introducción al estudio del desgaste". Universidad de São Paulo-Brasil, 2002.
2. BAYER, Raymond. Fundamentals of wear failures [en línea], 2002 [revisado 28 de julio 2018]. Disponible en Internet:
<http://jpkc.fudan.edu.cn/picture/article/348/1b/ee/6dce0ae740cf8673b53e4e96abb8/ab452849-53dd-461c-ad71-e0be2a004c7a.pdf>
3. MESA, G. H. D., Sinatora, A. El desgaste de materiales, enfrentarlo o dejarlo de lado y asumir los riesgos. Scientia et Technica [en línea], 1997 [revisado 30 de mayo 2018]. Disponible en Internet:
<http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/viewFile/7427/4441>
4. HIRANI, Harish. Adhesive wear. Lecture #7 [en línea]. Disponible en Internet:
<http://web.iitd.ac.in/~hirani/lec07.pdf>
5. VAN-STRAHLEN, Báez, P., Ballesteros, P. Evaluación del desgaste adhesivo de recubrimientos metálicos duros depositados por procesos de soldadura, con un tribómetro de cilindros cruzados. Revista ION, 22, 17-23 [en línea], 2009 [revisado el 30 de mayo 2018]. Disponible en Internet:
<http://www.redalyc.org/pdf/3420/342030280002.pdf>
6. DEVARAJU, A. A critical review on different types of wear of materials. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 6, 77-83 [en línea], 2015 [revisado el 30 de mayo 2018]. Disponible en Internet:
http://www.iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/ijmet/VOLUME_6_ISSUE_11/IJMET_06_11_009.pdf
7. TRUJANO, Leonal. Coeficientes tribológicos para acero al carbón AISI 1045 y acero aleado AISI 4140 (Tesis de especialización en ingeniería mecánica). Instituto Politécnico Nacional, México [en línea], 2011. Disponible en Internet:
https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/14550/1/SEPI%20E_SIME%20UA.pdf

- 8.** LUENGO-LÓPEZ, O. Estudio tribológico de fricción y desgaste de capas de aleación NiP (Tesis de pregrado). Escuela Técnica Superior, Barcelona [en línea], 2008. Disponible en Internet:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6299/Memoria%C3%93liver%20Luengo%20L%C3%B3pez%20Estudio%20de%20fricci%C3%B3n%20y%20desgaste%20de%20capas%20de%20aleaci%C3%B3n%20de%20NiP.pdf>
<file:///C:/Users/OWNER/Downloads/Conceptos%20y%20caracter%C3%ADsticas%20de%20la%20cavitaci%C3%B3n.pdf>
- 9.** T.OKADA AND Y. IWAI, Dep. of Mechanical Engineering, Cavitation Erosion”,Fukui University, japan, December, 1989.
- 10.** BRISCOE, B.J., & ADAMS, M.J. Tribology in particulate Technology. Adam Hilger,1987.
- 11.** FINNING, Módulo desgaste, Análisis de Fallas I, Finning Sudamérica-CAT [en línea]. Disponible en:
[http://www.ceduc.cl/aula/antof/materiales/MP/MP-420/AFA_Desgaste\).pdf](http://www.ceduc.cl/aula/antof/materiales/MP/MP-420/AFA_Desgaste).pdf)
- 12.** MARULANDA-ARÉVALO, J.L., Trisancho-Reyes, J.L., González-Betarcourt, H.A. Rociado térmico. Universidad Tecnológica de Pereira, primera edición, Pereira Colombia, 2015.
- 13.** DIN EN 657. (1994). Thermal Spray – Begriffe, Einteilung; Beuth-Verlag, Berlin.
- 14** Metco, Sulzer. An introduction to thermal spray [en línea], 2013. Disponible en:
https://www.upc.edu/sct/es/documents_equipament/d_324_id-804-2.pdf.
- 15.** WANSTRAND, O., Larsson, M., Heden, P. Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings, Surface and Coatings Technology 111, 1999, 247-254.
- 16.** RICHERT, M. W., MAZURKIEWICZ, A., SMOLIK, J. A. The deposition of WC-Co coatings [en línea], 2012 [revisado el 13 de julio 2018]. Disponible en:
http://carbosystem.com/wp-content/uploads/pdf_tungsten_e.pdf
- 17.** NORMA ASTM G76-13 Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets.

- 18.** PÉREZ, S. F. Renedo, E. C. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Licencia Creative Commons. Universidad de Cantabria [en línea], 2009 [revisado en 13 de julio 2018]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1307/course/section/1605/T04.pdf>
- 19.** AMORÓS, J. L., Mallol, G., Sánchez, E., García, J. Diseño de silos y tolvas para el almacenamiento de materiales pulvulentos [en línea], 2000. Universitat Jaume I, Castellón. Disponible en: <http://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/0013041s.pdf>
- 20.** GOODHEW, P. J., Humphreys, F. J., Beanland, R. Electron microscopy and Analysis, Taylor & Francis: London. 2º Ed,1988.
- 21.** GARCÍA, V. J., Mejía, J. E., Mesa, D. H. Estudio de la resistencia al desgaste erosivo en seco de materiales en ingeniería. Dyna, 71, 2004,
- 22.** BOLÍVAR, J. B. Instrumentación Industrial [en línea], 2012 [revisado en 30 de mayo 2018]. Disponible en Internet: <http://www.espanito.com/universidad-nororiental-privada-gran-mariscal-de-ayacucho-facu.html>
- 23.** DHIMAN, R. A., McDonald, S., Chandra. (2007). Predicting splat morphology in a thermal spray process. Surface & Coatings Technology, 201, 7789-7801.
- 24.** RABINOWICZ, E. Friction and Wear of Materials. New York, John Wiley and Sons,1995.

9. ANEXOS

Anexo A. Foto del adaptador galvanizado

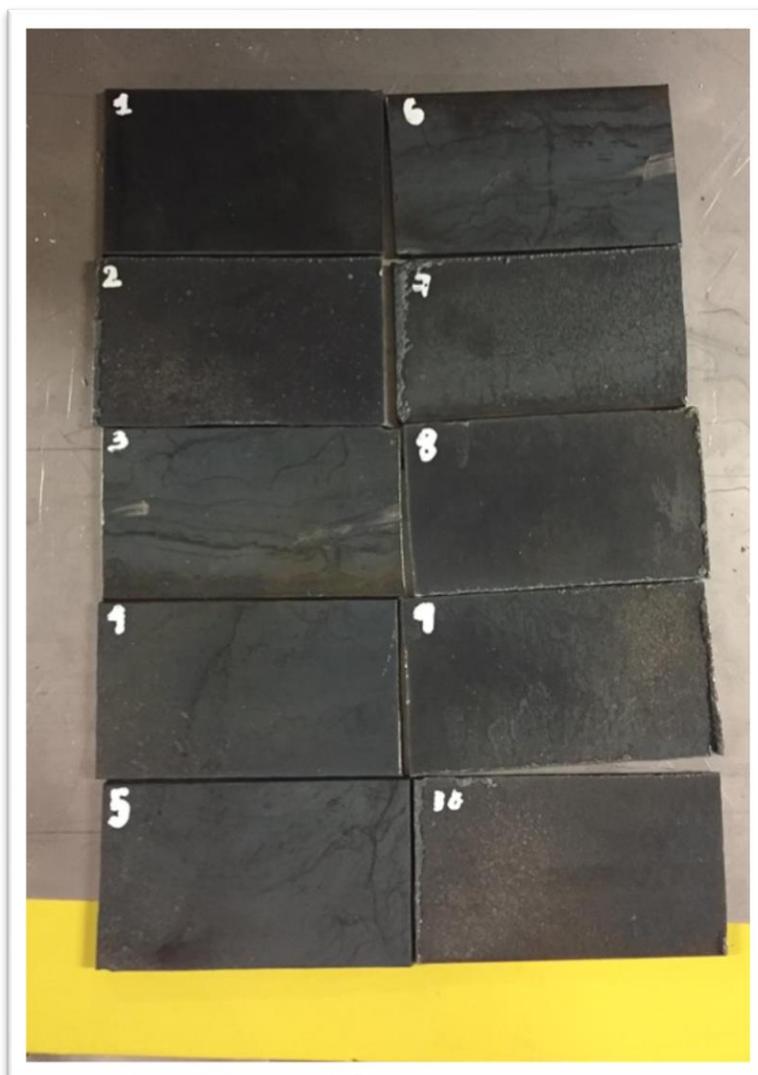


Anexo B. Foto del tubo roscado NPT.



Anexo C. Fotos de las probetas, el embudo y el imán utilizados en las pruebas.

Probetas



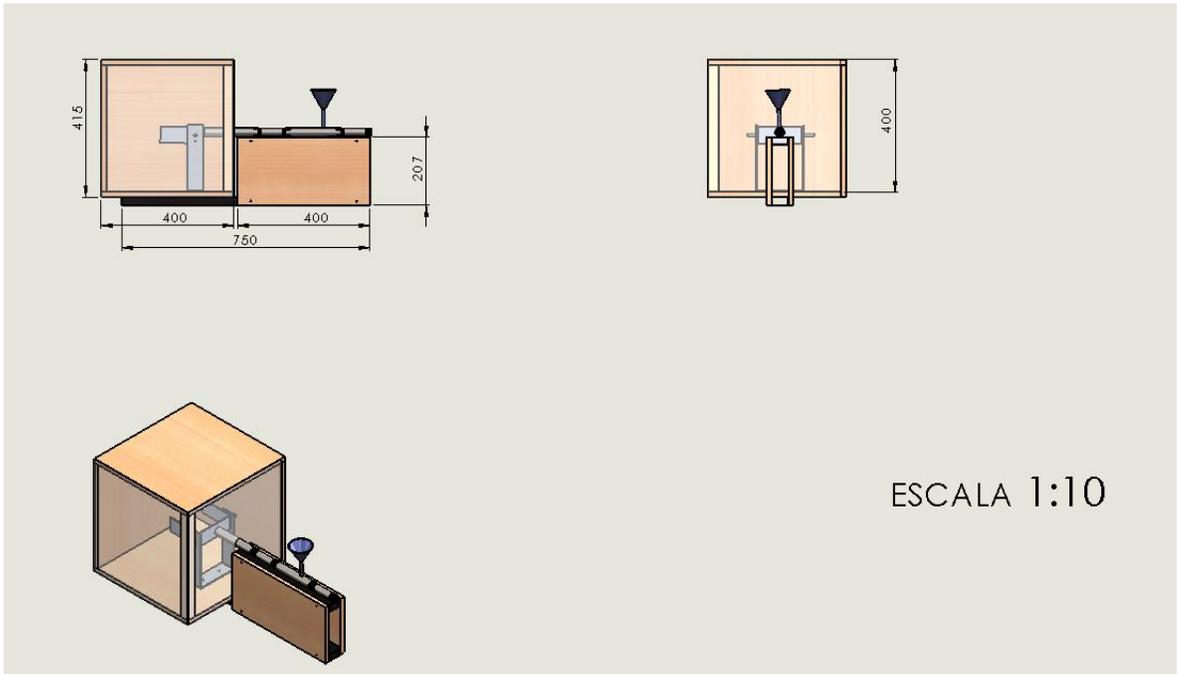
Embudo



Imán



Anexo D. Planos de ensamble total del equipo a utilizar.



Anexo E. Planos del ensamble de la caja del equipo.

