

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO POR
PARTÍCULAS SOLIDAS SEGÚN LA NORMA ASTM G-76 PARA UN ACERO
AISI-SAE 4140 SOMETIDO A DIFERENTES TRATAMIENTOS TÉRMICOS

NICOLÁS BENAVIDES ARIZA
BRYAN ANDRÉS JIMÉNEZ VILLARREAL

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2016

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO POR
PARTÍCULAS SOLIDAS SEGÚN LA NORMA ASTM G-76 PARA UN ACERO
AISI-SAE 4140 SOMETIDO A DIFERENTES TRATAMIENTOS TÉRMICOS

PRESENTADO POR:

NICOLÁS BENAVIDES ARIZA
BRYAN ANDRÉS JIMÉNEZ VILLARREAL

DIRECTOR:

CARLOS ARTURO BOHORQUEZ AVILA
INGENIERO MECÁNICO

UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.

2016

Nota de aceptación:

FIRMA DEL DIRECTOR

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de grado fue realizado bajo la supervisión del ingeniero Carlos Arturo Bohórquez Ávila a quien expresamos nuestro agradecimiento por el apoyo brindado y los conocimientos compartidos.

Agradecemos a Dios, a nuestras familias y amigos por el apoyo y esfuerzos brindados, para poder culminar nuestros estudios de pregrado.

A la Universidad Libre de Colombia, por ser la institución que nos permitió formarnos como profesionales, valoramos cada enseñanza y momento compartido.

A los ingenieros Mauricio Sierra Cetina y Héctor Fernando Rojas por su colaboración en el desarrollo del proyecto de grado y por último un sentido agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra forma ayudaron con amabilidad a la culminación del mismo.

TABLA DE CONTENIDO

1.	TÍTULO	9
2.	INTRODUCCIÓN	9
3.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
3.1	ANTECEDENTES DEL PROBLEMA.....	10
3.2	FORMULACIÓN.....	11
3.3	DESCRIPCIÓN.....	11
4	JUSTIFICACIÓN	12
5	OBJETIVOS	13
5.1	GENERAL	13
5.2	ESPECÍFICOS.....	13
6	MARCO REFERENCIAL.....	14
6.1	MARCO TEÓRICO	14
	Introducción a los Tratamientos Térmicos	14
6.1.1	Metales Ferrosos.....	14
6.1.2	Tratamientos Intercríticos.....	15
6.1.3	Acero AISI-SAE 4140	16
6.1.4	Ensayo de Desgaste.....	17
6.2	MARCO CONCEPTUAL	18
6.3	ESTADO DEL ARTE	19
6.3.1	EFFECTOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS DOBLE FASE	19
6.3.2	TÉCNICAS EXPERIMENTALES APLICADAS A ENSAYOS DE DESGASTE 21	
6.3.3	ENSAYO DE DESGASTE EROSIVO EN ACEROS.....	23
6.3.4	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI SAE 4140	24
6.4	MARCO LEGAL Y NORMATIVO.....	26
7	DISEÑO METODOLÓGICO	27
7.1	ANÁLISIS NORMA.....	27
7.2	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO	27
7.3	CONSTRUCCIÓN DEL TRIBÓMETRO	29

7.4	CONJUNTO SUMINISTRO DE PARTÍCULAS	31
7.5	CONJUNTO DE DISPARO DE LA MEZCLA.....	37
7.5.5	CALCULOS DEL VENTURI.....	38
7.6	ÁREA DE EROSIÓN	41
7.7	ESTRUCTURA	43
7.8	MATERIAL PARA EROSIÓN.....	45
7.9	ALISTAMIENTO DE PROBETAS.....	47
7.9.1	COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	47
7.9.2	CÁLCULO DE TEMPERATURAS CRÍTICAS	48
7.9.3	TEMPLE Y REVENIDO.....	49
7.10	ANÁLISIS DE MASA	54
7.11	ENSAYO DE DUREZA:.....	60
7.12	PROCEDIMIENTO ENSAYO DE DESGASTE.....	61
7.12.1	Calibración de presión.....	61
7.12.2	Realización del ensayo.....	61
8	RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	63
8.1	Análisis de resultados.....	63
8.3	Conclusiones.....	78
9	REFERENCIAS	79

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Compresor	29
Ilustración 2 Regulador de presión.....	30
Ilustración 3 Tolva de almacenamiento	32
Ilustración 4 Válvula de paso de material.....	33
Ilustración 5 Niple.....	34
Ilustración 6 Cono de suministro	35
Ilustración 7 Cono reductor.....	36
Ilustración 8 Tubo venturi.....	37
Ilustración 9 Boquilla.....	38
Ilustración 10 Venturi	40
Ilustración 11 Conjunto de disparo de la mezcla	40
Ilustración 12 Fabricación porta-probetas.....	41
Ilustración 13 Porta-probetas	41
Ilustración 14 Área de erosión	42
Ilustración 15 Estructura	43
Ilustración 16 Tribómetro	44
Ilustración 17 Tamiz.....	45
Ilustración 18 Malla 200 - 75 micras.....	46
Ilustración 19 Probeta normalizada.....	49
Ilustración 20 Mufla VULCAN D-550.....	50
Ilustración 21 Control de temperatura.....	50
Ilustración 22 Proceso de temple	51
Ilustración 23 Curva de temple	52
Ilustración 24 Proceso de revenido	53
Ilustración 25 Curva de revenido	54
Ilustración 26 Balanza SARTORIUS.....	55
Ilustración 27 Medición de masa	56
Ilustración 28 Durómetro.....	60
Ilustración 29 Tasa de erosión grupo Bonificado.....	63
Ilustración 30 Tasa de erosión grupo Revenido.....	64
Ilustración 31 Tasa de erosión grupo Templado.....	65
Ilustración 32 Comparación Tasa de erosión	66
Ilustración 33 Medición de masa antes y después del ensayo por probeta Bonificada.....	67
Ilustración 34 Medición de masa antes y después del ensayo por probeta Revenida	67
Ilustración 35 Medición de masa antes y después del ensayo por probeta Templada	68
Ilustración 36 Perdida por probeta Bonificado.....	69
Ilustración 37 Perdida por probeta Revenido	69
Ilustración 38 Perdida por probeta temple	70
Ilustración 39 Comparación pérdida de masa por probeta.....	70
Ilustración 40 Estereoscopio	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Características compresor.....	30
Tabla 2 Características regulador de presión.....	31
Tabla 3 Características Tolva de almacenamiento.....	32
Tabla 4 Características válvula de paso de material.....	33
Tabla 5 Características niple.....	34
Tabla 6 Características cono de suministro.....	35
Tabla 7 Características Cono reductor.....	36
Tabla 8 Características tubo venturi.....	37
Tabla 9 Características boquilla.....	38
Tabla 10 Variables para el diseño de venturi.....	39
Tabla 11 Cálculos del venturi.....	39
Tabla 12 Características área de erosión.....	42
Tabla 13 Características estructura.....	43
Tabla 14 Características Tamiz.....	46
Tabla 15 Características de la arena.....	46
Tabla 16 Componentes químicos presentes en el acero AISI SAE 4140.....	47
Tabla 17 Formulas Temperaturas críticas.....	48
Tabla 18 Temperaturas críticas del acero AISI SAE 4140.....	48
Tabla 19 Características Probeta normalizada.....	49
Tabla 20 Características mufla.....	51
Tabla 21 Características proceso de temple.....	51
Tabla 22 Características proceso de revenido.....	53
Tabla 23 Características balanza.....	55
Tabla 24 Características medición de masas por probeta.....	56
Tabla 25 Masa de las probetas del grupo revenido.....	57
Tabla 26 Masa inicial por probeta del grupo Revenido 600°C.....	57
Tabla 27 Masa de las probetas del grupo temple.....	58
Tabla 28 Masa inicial por probeta del grupo Temple 900°C.....	58
Tabla 29 Masa de las probetas grupo Bonificado.....	59
Tabla 30 Masa inicial por probeta del grupo Bonificado.....	59
Tabla 31 Durezas por probeta.....	60
Tabla 32 Disposición de tiempos para el ensayo de desgaste.....	61
Tabla 33 Imágenes estereoscopía.....	72

1. TÍTULO

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE EROSIVO POR PARTÍCULAS SOLIDAS SEGÚN LA NORMA ASTM G-76 PARA UN ACERO AISI-SAE 4140 SOMETIDO A DIFERENTES TRATAMIENTOS TÉRMICOS

2. INTRODUCCIÓN

Este es un proyecto de grado enfocado a realizar investigación en la ciencia de los materiales en la Universidad Libre de Colombia, seccional Bogotá facultad de ingeniería. No es un secreto que la ingeniería mecánica dictada en la universidad es una herencia que dejó la ya desaparecida ingeniería metalúrgica, es por esta razón que el ingeniero mecánico de la universidad libre tiene un gran enfoque al tratamiento térmico de los materiales. En varios proyectos de grado llevados a cabo por estudiantes en busca de obtener su título de pregrado, aparecen títulos referentes a investigación en la mejora de propiedades mecánicas de los aceros, algunos estudiantes buscan mejorar éstas por medio de tratamientos criogénicos, otros van más adentro elaborando materiales compuestos y de esta manera obtener mejores características o simplemente características deseadas. En vista de que se realizan estos experimentos surge la necesidad de generar herramientas o métodos para comparar diferentes comportamientos de los aceros sometiéndolos a los ya conocidos ensayos, como son ensayos de dureza, ensayos de microscopía, tracción, torsión etc.

En este proyecto se realizaron diferentes tratamientos térmicos como el temple y el revenido, a un acero AISI SAE 4140 con el fin de mejorar su resistencia al desgaste erosivo, para dar validez a una mejora o no del material después del tratamiento es necesario someterlo a un ensayo de resistencia al desgaste erosivo, tal ensayo es descrito de manera muy completa por la norma ASTM G76, en donde se especifica de manera muy concreta qué características debe tener el equipo tipo tribómetro y bajo qué condiciones se debe realizar el ensayo para obtener resultados válidos.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

3.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

3.1.1 Desgaste en ejes

Durante las últimas décadas, el control de las fallas en los ejes ha progresado significativamente debido a la evolución de la ciencia de los materiales y la ingeniería mecánica en general sin embargo aún se presentan fallas en elementos mecánicos, en Mar del Plata, un grupo de tribología de la facultad de ingeniería (RODRIGUEZ, E.; FLÓRES, M. and MERCADO, R. , 2009) realizó un estudio que consiste en el análisis de falla de un eje de caja reductora de velocidad fabricado en acero SAE 4140; las fallas por fatiga en ejes se presentan cuando éste es sometido a tensiones cíclicas, los autores ponen en discusión los factores que pudieron influir en la nucleación de la falla sugiriendo que el valor del esfuerzo aplicado resultó superior al valor de diseño y que la resistencia del material no fue la esperada, sin embargo después de realizar todo un proceso experimental de microscopía y ensayo de dureza, se llegó a varias conclusiones, La primera es que el material no posee tratamiento térmico, esto resulta en que su resistencia es menor a la especificada en la norma SAE 4140 para un estado normalizado; y la segunda es que el cambio de sección en el eje genera un factor concentrador de esfuerzo y es justo allí donde se genera la falla.

3.1.2 Remoción general en recubrimientos suaves

En la industria automotriz es común encontrar desgaste erosivo en las hojas de las hélices y abanicos, puesto que la pintura del lado posterior o cóncavo de la paleta generalmente es removida por la acción cortante del polvo y partículas de tierra en el aire, (SOTO ROMERO, Efraín) impactando las superficies de los componentes mencionados, en el automóvil.

3.1.3 Desgaste en cigüeñales

En un trabajo llevado a cabo en la Universidad de Virginia-USA (VALDÉS, J; CORONADO, J. and GARCÍA, J.), se estudió la causa de una falla presentada en un cigüeñal fabricado en acero de medio carbono 4340, el cual es sometido a esfuerzos cíclicos en el cumplimiento de sus funciones normales. En esta investigación se encontró que la causa raíz se generó en el proceso de fabricación del cigüeñal, ya que la norma SAE de este material

especifica un tratamiento térmico de Bonificado (Temple y Revenido), con el fin de obtener una dureza que se encuentre por encima del esfuerzo que según su diseño, el eje soportará en el desarrollo de sus funciones, En este caso en particular hubo un *fuera de especificación* en las temperaturas de los tratamientos térmicos previos, encontrando que las durezas en el núcleo del material no eran las recomendadas para el uso.

3.2 FORMULACIÓN

Determinar la influencia de los tratamientos térmicos de temple y revenido, para medir la resistencia al desgaste erosivo por partículas sólidas en la superficie de un acero AISI SAE 4140, haciendo uso de un tribómetro basado en la norma ASTM G-76.

3.3 DESCRIPCIÓN

En la vida de los materiales utilizados en ingeniería se encuentran gamas de consumo de diferentes valores, según las necesidades o propiedades mecánicas, que se solicitan estrictamente en cada uno de los trabajos a los que acobija la labor ingenieril, como lo es la relación Peso vs. Consumo en un automóvil, así como también son los ciclos de uso de una herramienta para la construcción. Es por esto que se necesitan avances tecnológicos en la ingeniería de los materiales, creando nuevas alternativas que mejoren en propiedades mecánicas, o generando una reducción en costos de los materiales a utilizar en la industria.

Cuando se utiliza un material en un trabajo de ingeniería, es común que se vea afectado por factores que alteran las condiciones de funcionamiento, que fueron planteadas en la etapa de diseño, en un equipo o planta, factores como la temperatura, fatiga y el desgaste, son algunos de los que hacen esa variación paulatina del funcionamiento en ellos.

El desgaste es un problema en ingeniería que se viene trabajando con gran furor ya que altera los parámetros dimensionales de una pieza, por la acción de un movimiento relativo entre dos superficies en contacto hay diversas clases de desgaste, todas ellas con una gran repercusión en la eficiencia y funcionalidad de equipos y/o elementos mecánicos, una mejora en la vida útil de una pieza en una máquina se transforma en ahorro energético, ya que ésta trabaja bajo parámetros de diseño mucho más tiempo, comparada con un elemento que ha sufrido desgaste, por esto se llega a un ahorro económico, en aspectos como lo son el mantenimiento, reparaciones y posibles reemplazos de piezas o materiales.

4 JUSTIFICACIÓN

Para encontrar mejoras a las problemáticas que se ven en la industria, se necesitan espacios óptimos para la realización de actividades, enfocadas a la investigación, con estas encontrar un desarrollo de soluciones, mejoras e innovación, a las necesidades latentes hoy día.

El estudio del desgaste en los materiales genera una acogida considerable en las industrias, y genera gran demanda de mejoras en las tecnologías de los materiales actualmente, por esta razón ha surgido la necesidad de construir una máquina que cumpla con los requerimientos para medir el desgaste, según la norma ASTM G-76 y con ella investigar los resultados de pérdida volumétrica en probetas de acero AISI-SAE 4140 sometido a diferentes etapas de tratamientos térmicos.

Con ello incentivar el trabajo e investigación en la Universidad Libre de temas relacionados con el desgaste.

5 OBJETIVOS

5.1 GENERAL

Analizar y comparar la resistencia al desgaste erosivo por partículas sólidas según la norma ASTM G-76 para un acero AISI-SAE 4140 sometido a diferentes tratamientos térmicos.

5.2 ESPECÍFICOS

- Construir el tribómetro para realizar el ensayo de desgaste erosivo por partículas sólidas según la norma ASTM G-76.
- Establecer las propiedades mecánicas y dimensionales del material para desarrollar el ensayo.
- Efectuar el ensayo de desgaste erosivo en las probetas siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM G-76.

6 MARCO REFERENCIAL

6.1 MARCO TEÓRICO

Introducción a los Tratamientos Térmicos

En el estudio de los materiales para ingeniería se encuentra un campo de investigación cuyo fin es alterar algunas características inherentes de estos, para obtener propiedades que suplan diversas necesidades. En el caso de los metales se busca modificar la microestructura sin alterar sus cualidades o características esenciales con el fin de aumentar propiedades mecánicas que permitan al material mejorar su desempeño en la labor requerida, uno de los métodos más usados para esto es el tratamiento térmico que consiste en someter al material a una serie de calentamientos y enfriamientos controlados sin que haya un cambio en su composición química. (MOLERA SOLÁ, Pere.)

6.1.1 Metales Ferrosos

Los metales ferrosos se dividen en dos grupos, fundiciones y aceros, su principal diferencia es el contenido de carbono en ellos, las fundiciones tienen en su composición química más del 2% de contenido de carbono, los aceros a su vez, se pueden clasificar por su nivel de contenido de carbono en: alto, medio o bajo (GUZMAN ORNELAS, Fernando.), cada uno de ellos con su microestructura característica variando propiedades mecánicas en el material; Los constituyentes en las diferentes microestructuras visibles bajo técnicas de microscopía óptica o electrónica, son: Martensita, Austenita, Ferrita, Perlita, Cementita, etc. (ASKELAN, Donald R.)

Austenita: es el constituyente más denso de los aceros que se caracteriza por su gran resistencia al desgaste y su magnetismo, es estable a temperaturas mayores a los 723 ° C a temperaturas inferiores a ellas se parte en ferrita y cementita.

Ferrita: se resalta en este constituyente su tenacidad y su gran maleabilidad haciéndolo el más blando de los aceros.

Perlita: es la unión de láminas alternadas de ferrita más cementita, la perlita es más blanda y maleable que la cementita al igual que más dura y resistente que la ferrita.

Martensita: es la estructura que se forma de la transformación de la austenita a una velocidad mayor que la velocidad crítica de temple,

Cementita: Es el constituyente más duro de los aceros al carbono, posee una resiliencia casi nula y gran fragilidad; tiende a tener altos concentradores de esfuerzos los materiales que poseen estos constituyentes, debido a esto no se utilizan en procesos de laminado o forja. (ASKELAN, Donald R.)

Perlita: Es la unión de la cementita junto a la ferrita, se denomina así por su apariencia al microscopio parecidas a las perlas.

Los tratamientos térmicos que más se utilizan en la industria son el normalizado, temple y revenido.

El normalizado consiste en calentar el acero por encima de la temperatura crítica y dejar enfriar en aire, produciendo así en la microestructura una perlita fina, favoreciendo la resistencia mecánica del acero tratado. Es el tratamiento térmico más usado en aceros de bajo carbono ya que no tienen una buena templabilidad por ende no es viable encontrar en ellos una estructura martensítica después de tratados. (SMITH, William F.)

6.1.2 Tratamientos Intercríticos

Uno de los tratamientos térmicos más comúnmente realizados, son los desarrollados entre temperaturas críticas, rango de temperaturas en donde coexisten la austenita y la ferrita. En dichos tratamientos se utilizan medios de enfriamiento severos como el agua para aumentar la velocidad de enfriamiento, con ello transformar la austenita en martensita y conseguir una estructura final de ferrita más martensita, con una ligera porción de austenita retenida. Esta presencia de martensita resulta en una alta resistencia mecánica y la ferrita le otorga al material tratado una buena ductilidad. (BELZUNCE VARELA, Francisco.)

Esta austenita retenida también resulta en la microestructura final después de los tratamientos térmicos debido al contenido de elementos aleantes que tenga un acero, estos elementos se usan con el fin de mejorar las propiedades de este en condiciones más hostiles, como lo son, condiciones de temperatura extremadamente altas o bajas, condiciones de ambiente corrosivo, etc.

Una de las características a tener en cuenta a la hora de hacer un tratamiento térmico intercrítico en un acero es saber si este posee o no elementos aleantes o no, ya que dichos elementos químicos generan una alteración en dichas temperaturas (A1-A3), también ocasionando que la capacidad de un acero a endurecerse brindándole un enfriamiento rápido después de calentarlo o también llamada condición de templabilidad en estos crezca.

6.1.3 Acero AISI-SAE 4140

Uno de los aceros aleados que se utiliza en la industria es el AISI-SAE 4140 con una cantidad de carbono nominal del 0.38 al 0.43% de Carbono (acero de medio carbono) al cromo molibdeno (SUMITEC S.A.) Que por su relación costo beneficio en usos tales como: Engranajes, ejes, cigüeñales, ejes reductores, tornillos de alta resistencia, destornilladores, llaves de mano, brocas, cuerpos de escariadores, etc. Es muy comercializado ya que posee buena resistencia a la fatiga, alta templabilidad, también una gran capacidad al impacto y resistencia a la abrasión.

Ya que este acero es utilizado en condiciones de fatiga por sus buenas propiedades mecánicas, se le hacen pruebas para tener la confiabilidad de que es un material óptimo para un uso deseado por un ingeniero en la industria, una de las pruebas aplicables al material es el uso de los también llamados ensayos de desgaste. El desgaste es uno de los fenómenos de degradación más importantes en piezas mecánicas y equipos industriales con la fatiga y la corrosión. También se puede definir como el daño superficial que sufre un material después de ser sometido a sus condiciones de trabajo. Ocasiona una ligera pérdida de material y por ende de dimensiones en las piezas, llevando consigo daños en funcionamiento de diseño de los productos por la variación en las tolerancias dimensionales. Hay diferentes tipos de desgaste, que son:

- Desgaste de Contacto: se da en las superficies debido a un deslizamiento entre piezas ocasionando intensas deformaciones por la acción de la fricción y las tensiones de contacto, este tipo de desgaste altera la estructura y el tamaño de grano, se ve un agrietamiento superficial en algunos de los casos de los materiales sometidos a este tipo de desgaste.
- Desgaste abrasivo: cuando partículas duras se ven forzadas contra una superficie y pasan a lo largo de esta se obtiene una pérdida de material, se diferencia del desgaste por contacto por su grado de desgaste, siendo el abrasivo más dañino para los materiales. Estas partículas abrasivas pueden pertenecer a una u otra de las superficies en contacto, a ninguna de ellas siendo partículas entre dos superficies que ocasionan desgaste.
- Desgaste por cavitación: se da en equipos hidráulicos debido al crecimiento y colapso de pequeñas partículas en contacto con una superficie.
- Desgaste adhesivo: existe una interacción inter-facial entre dos superficies y con ello una micro soldadura en frío, de componentes asociados a los materiales ocasionando una pérdida de material en una superficie y una ganancia en la otra, es ayudado por las altas presiones y altas rugosidades entre las superficies. Esta pérdida de material se da por el rompimiento de los enlaces en la sujeción de la superficie. Si ésta micro unión de partículas

con una superficie tiene la suficiente resistencia al corte, se puede dar un desgaste abrasivo en la superficie que perdió material.

6.1.4 Ensayo de Desgaste

Existen diferentes formas de hacer un ensayo de desgaste, dependiendo el medio abrasivo que se utilice, o si es un medio erosivo el que dañe progresivamente el material.

Un ensayo de desgaste abrasivo (REY MERLO, César Damián.) Depende del tamaño de las partículas que se usan como material abrasivo, la dureza de dichas partículas, como también de la forma de ellas, ahora también se puede hacer de la frecuencia una variable con la cual golpean el material a evaluar las partículas abrasivas y la fuerza con la cual son arrojadas al material de prueba. Lo que se desea en dichas pruebas es homologar las condiciones del medio ambiente abrasivo para evaluar el comportamiento del material y saber si es el deseado o no. Si el material evidencia una pérdida volumétrica mayor a la deseada después de ser sometido a los ensayos hay que observar el por qué y buscar una solución.

Cuando se habla de desgaste erosivo se infiere que las partículas que chocan contra una superficie no son solamente sólidas sino también líquidas e incluso gaseosas haciendo así un ambiente salino o costero un medio erosivo para el desgaste, tratando las partículas como fluidos de desgaste sin importar la fase en la cual estén. También se debe tener en cuenta para estudios de desgaste erosivo el ángulo de incidencia con que chocan los fluidos con la superficie que se desgasta, ya que ángulos cercanos a los noventa grados causan una deformación plástica en las superficies y los cercanos a los cuarenta y cinco grados deforman y cortan el material de la superficie. Otra consideración que se debe hacer es si la probeta o muestra de material se va a tratar en un medio seco, donde las partículas viajan por arrastre del aire y son obligadas a impactar sobre la superficie a estudiar, o en un medio húmedo o acuoso, donde una corriente líquida es la que se encarga de hacer que las partículas impacten contra una superficie.

La dureza es una propiedad mecánica de los materiales que se opone a la deformación plástica, es muy importante y se es mejorada por medio de tratamientos térmicos, una definición clara para la dureza es la fuerza reactiva que presentan los materiales a ser alterados, ya sea por penetración, a ser rayados, deformaciones permanentes, etc. Las escalas de dureza más conocidas y utilizadas son:

- Dureza Vickers: cuyo penetrador es un diamante en forma de pirámide, es apto para chapas de hasta 2 mm de espesor.

- Dureza Rockwell: la punta es un cono de diamante o también una esfera de acero, es apta medición para todos los materiales y suele dejar una huella pequeña y confiable.
- Dureza Brinell: la punta es una bola de carburo de wolframio o de acero templado, no es recomendable para materiales duros, no se considera una medición exacta pero posee gran facilidad de aplicación.

Dichas propiedades mecánicas del AISI-SAE 4140 antes mencionadas se pueden mejorar por medio de una derivación de los tratamientos térmicos enfocada en los tratamientos bajo cero, como lo son la criogenia y los tratamientos subcero, no son tan usados como los tratamientos donde se calienta, mantiene y se enfría de forma controlada.

6.2 MARCO CONCEPTUAL

- AUSTENITA: Es el constituyente más denso de los aceros que se caracteriza por su gran resistencia al desgaste y su magnetismo, es estable a temperaturas mayores a los 723 ° C a temperaturas inferiores a ellas se parte en ferrita y cementita.
- FERRITA: Se resalta en este constituyente su tenacidad y su gran maleabilidad haciéndolo el más blando de los aceros.
- MARTENSITA: Es la estructura que se forma de la transformación de la austenita a una velocidad mayor que la velocidad crítica de temple.
- PERLITA: Es la unión de láminas alternadas de ferrita más cementita, la perlita es más blanda y maleable que la cementita al igual que más dura y resistente que la ferrita.
- CEMENTITA: Es el constituyente más duro de los aceros al carbono, posee una resiliencia casi nula y gran fragilidad; tiende a tener altos concentradores de esfuerzos los materiales que poseen estos constituyentes, debido a esto no se utilizan en procesos de laminado o forja.
- ACEROS DOBLE FASE: Son aquellos aceros que presentan en su microestructura final, es decir, después del tratamiento térmico, una combinación entre una fase dura y una matriz blanda.

- TEMPLE: Es un tratamiento térmico al que se somete un acero aleado para endurecerse por la formación de martensita, consiste en calentar el acero por encima de A1 y enfriar rápidamente.
- DESGASTE EROSIVO: Es el desgaste que se produce en la superficie de un cuerpo por la acción de agentes externos tales como el agua y el viento, o por la fricción continua de otros cuerpos.
- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (SEM): se basa en el principio de microscopía óptica, pero se el haz de luz por un haz de electrones obteniendo así mayor resolución.
- DUREZA: Es la propiedad que posee la superficie de un material para resistir la deformación o ruptura, que puede ser causada por el esfuerzo de contacto con otro material más duro.
- TRIBOLOGÍA: Es la ciencia y tecnología encargada de analizar los fenómenos de lubricación, fricción y desgaste resultantes de la interacción de elementos móviles o fijos.
- ACERO SAE 4140: Es un acero de temple en aceite de medio carbono aleado al cromo-molibdeno de buena penetración de temple y con buenas características de estabilidad en caliente.
- SAND-BLAST: Hace referencia a la técnica llamada “arena a presión”, que consiste en la limpieza de una superficie por la acción de un abrasivo granulado expulsado a través de una boquilla mediante aire comprimido. Esta técnica es usada para reducir impurezas, como oxido, grasa, pintura y cualquier tipo de recubrimiento de las superficies preparándolas para la aplicación de un recubrimiento.

6.3 ESTADO DEL ARTE

6.3.1 EFECTOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS ACEROS DOBLE FASE

Los aceros doble fase son una rama importante de alta resistencia dentro del grupo de baja aleación, éstos tienen una combinación de propiedades muy importante ya que poseen alta resistencia a la tracción y a su vez buena ductilidad, en el año 2009 un grupo de estudiantes en Irán (MOVAHED, P., et al.) publica un artículo titulado *“The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties and work hardening behavior of ferrite–martensite dual phase steel sheets”* en este

trabajo se buscó investigar las propiedades de tracción y el comportamiento del endurecimiento de una serie de aceros doble fase que contiene ferrita y martensita, con diferentes porcentajes en volumen de martensita, las probetas fueron sometidas a tratamiento térmico intercrítico variando la temperatura de temple, pruebas de dureza, ensayos de tracción e investigación microestructural, en cuanto a los resultados y discusión de este trabajo se destacan varios aspectos importantes, en primer lugar la variación en la temperatura de temple genera cambios en el volumen de martensita que se observa después de este, a mayor temperatura, mayor es el porcentaje de martensita obtenida y esto por supuesto se ve reflejado en el aumento de la dureza, y en segundo lugar el análisis de las gráficas arrojadas por el ensayo de tracción muestran como varía la resistencia a la fluencia que va aumentando de manera lineal a medida que aumenta el volumen de martensita mientras que la resistencia última primero aumenta con el aumento del porcentaje de martensita y luego permanece constante, de hecho la resistencia última llega a su punto máximo cuando se obtiene el 50% de martensita.

Los aceros de doble fase también llamados aceros avanzados de alta resistencia están compuestos por islas martensíticas duras en una matriz relativamente blanda y dúctil de ferrita, debido a la importancia de este tipo de aceros, en 2014 unos jóvenes en la India (SHARMA, Ankit; KUMAR, Abhishek and TYAGI, Rajnesh.), realizaron un estudio para examinar el efecto del ángulo y la velocidad del chorro en un ensayo de desgaste erosivo para explorar la correlación entre la microestructura de los aceros doble fase y el ensayo erosivo, titulado "*Erosive wear analysis of medium carbon dual phase steel under dry ambient condition*", se realizaron pruebas de desgaste en chorro de aire utilizando arena sílice de 200 micras a tres velocidades diferentes 45, 72 y 95 m/s para tres ángulos de incidencia diferentes de 30°, 60° y 90° sobre un acero del 0,4% de carbono que ha sido sometido a un tratamiento térmico intercrítico, éste fue tratado con diferentes tiempos de permanencia para obtener diferentes fracciones de volumen de martensita antes de someter al ensayo de desgaste erosivo, el estudio arrojó una conclusión muy puntual en la tasa de desgaste en el acero y es que el máximo desgaste se da a 30° en el ángulo de incidencia y a 95 m/s en la velocidad de impacto, es decir, el mínimo ángulo de incidencia y la máxima velocidad debido al efecto combinado de impacto y deslizamiento.

En ingeniería se encuentran trabajos y usos muy especiales y específicos para los materiales así como se conoce que la fragilidad va ligada a la alta dureza y la ductilidad a la baja se ha llegado a una línea de estudio de los materiales llamada aceros doble fase, a comienzos de este año (DE LA CONCEPCIÓN, Valeria L.; LORUSSO, Hernán N. and SVOBODA, Hernán.) en la universidad de Guijón en España se realizó una caracterización microestructural de diferentes aceros doble fase, para hallar con diferentes temperaturas y contenidos de carbono en los aceros cualidades únicas para el uso en ingeniería, asumiendo así algunos materiales tratados térmicamente entre temperaturas críticas consiguiendo así mezclas de fases entre ferrita y martensita, esto lleva a tener aceros duros y buenas condiciones

de fragilidad, comparados con aceros de composición martensítica exclusivamente. Los estudios de resultados se vieron enfocados hacia durezas, resistencia al impacto, análisis de falla y fatiga de los diferentes aceros. Abriendo así una puerta para el desarrollo de nuevas propiedades mecánicas en los aceros tratados térmicamente.

Los aceros inoxidable súper dúplex (SDSS) tienen una microestructura de dos fases de fracciones aproximadamente iguales en volumen de ferrita en estado alfa, y austenita, en estos aceros se ve un equilibrio de fuerza, tenacidad a baja temperatura y resistencia a la corrosión que hacen de este tipo de aceros un material de construcción importante en la industria petrolera, ya que sus características anticorrosivas son muy útiles en medios agresivos, en 2013 se dio a conocer un trabajo realizado en conjunto en tres universidades de México, Japón y Canadá, por los estudiantes (RAMIREZ SALGADO, J., et al.) llamado "*Detection of secondary phases in duplex stainless steel by magnetic force microscopy and scanning Kelvin probe force microscopy*", el objetivo de esta investigación era realizar una caracterización microestructural de aceros SDSS por diferentes métodos tales como (AFM: Atomic Force Microscopy), (MFM: Magnetic Force Microscopy) y (SKPFM: scanning Kelvin Probe Force Microscopy) y realizar una comparación y evaluación para saber que método puede llegar a ser más eficaz en la microscopía de aceros doble fase, arrojando conclusiones como, el análisis AFM muestra el contraste de fases en la imagen pero necesita de un análisis SEM para lograr distinguir cuál es cuál, además el análisis MFM reveló una especie de estructura fantasma probablemente relacionada con el pulido mecánico que se le realizó al metal previamente.

6.3.2 TÉCNICAS EXPERIMENTALES APLICADAS A ENSAYOS DE DESGASTE

Cuando se realizan ensayos de desgaste erosivo en bancos de prueba neumáticos, es muy común escuchar hablar del "efecto blindaje" que consiste en la concentración de partículas en los codos o lugares que puedan causar acumulación de éstas, dicha concentración es un factor muy importante que puede afectar la velocidad de erosión de superficies sólidas bajo el impacto de partículas, ya que la velocidad es una variable que se debe controlar por su gran importancia en la tasa de desgaste del material en 2013 en la universidad de Bologna, Italia un grupo de estudiantes (MACCHINI, R.; BRADLEY, M.S. and DENG, T.), realizaron una investigación titulada "*Influence of particle size, density, particle concentration bend erosive wear pneumatic conveyors*". En este estudio se investigaron los efectos de la concentración de partículas sobre la erosión de una superficie curva de acero, utilizando diferentes tipos de partículas en un banco de pruebas neumático a escala industrial, en el procedimiento se utilizaron los materiales de la siguiente manera, dos tenían la misma densidad pero sus tamaños de partículas eran muy diferentes,

y dos tenían tamaños muy similares pero densidades muy diferentes, los resultados experimentales confirmaron que el efecto blindaje si se produce a causa de la concentración de partículas y además deja en claro la relevancia que posee la densidad de partículas en el ensayo erosivo.

El comité ASTM G2 aprueba como definición de desgaste abrasivo: “desgaste debido a partículas duras o protuberancias duras forzadas contra y en movimiento a lo largo de una superficie solida”, dicha definición explica en qué consiste realizar un ensayo de desgaste abrasivo a una pieza, una forma de calcular o cuantificar el desgaste que sufrió un sólido es por medio del volumen del material que ha sido fracturado o desplazado por un cono de deslizamiento que se mueve a lo largo del material, existe un fenómeno en este ensayo causa de investigación para los ingenieros y es la transferencia por adhesión de las partículas abrasivas sobre el material sometido a la prueba, en 2010 (BUDINSKI, Kenneth G.) realizó un estudio experimental sobre dicho fenómeno para observar las primeras etapas de la abrasión, “*Adhesive transfer to abrasive particles in abrasion testing*” para contextualizar, en el ensayo se habla de tres cuerpo involucrados: la superficie plana que se somete al desgaste, las partículas duras y abrasivas, y una rueda de goma que fuerza a las partículas contra la superficie plana. En este procedimiento se utilizó una rueda de goma de neopreno de diámetro 110 mm y ancho de 12,5 mm, la velocidad de la rueda fue de 30 RPM o 0,17 m/s, se colocó la rueda sobre la superficie plana con una fuerza normal de 55 N, y la duración de ensayo fue de 155 m de deslizamiento, el abrasivo era alimentado a velocidad constante para mantener la rueda siempre cubierta con el abrasivo. Utilizando micrografías ópticas se arrojaron ciertos resultados y conclusiones respecto al fenómeno de adhesión y se observaron diferentes formas de “rayado” en la rueda de gomas producidas por las partículas que se adhieren a la superficie contaminando de esta manera el ensayo.

Los tribómetros de bola giratorias para micro-abrasión se utilizan comúnmente para llevar a cabo pruebas de desgaste en recubrimientos duros delgados, en (2009) un grupo de ingenieros mecánicos de Portugal (ANDRADE, M.F., et al.) realizó un estudio llamado “*Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion wear tests of TiAlSiN thin coatings*” en este estudio se realizaron pruebas de desgaste con diferentes tipos de abrasivos, como alúmina (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC) o diamante, el objetivo de este trabajo era correlacionar el tamaño de las partículas con la cantidad de material eliminado, para la parte experimental se utilizó SiC abrasivo en agua destilada con tres tamaños diferentes de partículas con el fin de evaluar el comportamiento de desgaste de una película dura delgada de TiAlSiN, éste material fue sometido a pruebas de micro-dureza y para visualizar el efecto abrasivo de las partículas se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM). Al concluir el experimento se pueden evidenciar patrones que ya se esperaban pero que era necesario corroborar, es evidente que las partículas más grandes tienen un comportamiento diferente a través del contacto pues la entrada de las partículas es más difícil y un menor número de partículas llevan la carga normal presentando así

un comportamiento al azar en la huella que puedan dejar, por otra parte las partículas más pequeñas tienden a presentar un comportamiento más lineal con más partículas soportando la carga normal con mayor tiempo de contacto originando así unos surcos bien definidos.

6.3.3 ENSAYO DE DESGASTE EROSIVO EN ACEROS

Cuando se trata de optimizar costos en procesos con materiales especiales se puede entrar a la rama de los recubrimientos, que se basa en una matriz de material con unas condiciones específicas y una superficie con condiciones especiales diferentes, en el año 2009 (GOMEZ, Ronald M.) Maestros de la ingeniería de materiales en Valencia-España realizaron una investigación llamada “*estudio del comportamiento a desgaste erosivo de recubrimientos WC-CO micro y nano estructurados*”. La cual consistía en someter diferentes probetas de aceros con características en los recubrimientos variables a desgaste erosivo utilizando como material de desgaste Alúmina, encontrando resultados interesantes en cuanto al ángulo de impacto de la partícula y la superficie a testear, encontrando que a menores ángulos la remoción de recubrimiento es menor a ángulos cercanos a los 90°, a condiciones de flujo y presión constantes.

Al hablar de aceros especiales se debe tomar el tema de los Inoxidables, ya que por su porcentaje de cromo además de otros elementos presentes en su composición los hace inhibidores de la corrosión, generando así un material con buen desempeño en condiciones extremas, hacia el año 2012 (GAONA, Alejandro.; GARCÍA, Jorge A. and FRANCISCO, Cauhtemoc.) en Veracruz-México se compararon aceros inoxidables con diferentes estructuras cristalinas, el trabajo investigativo se denominó “ANALISIS DEL DESGASTE EROSIVO CAUSADO EN ACEROS INOXIDABLES AISI/SAE 304, 316 Y 410” en él se encontró como conclusión después de someter los aceros a pruebas de desgaste erosivo que la estructura martensítica soporta mejor el impacto de partículas sólidas, comparado con la estructura austenítica, también se encontró que no son materiales propensos a la ductilidad al desgaste por impacto de partículas evidenciando fracturas frágiles en las huellas del material después de pasar por la prueba.

Los aceros inoxidables martensíticos son aleaciones endurecidas por tratamiento térmico que poseen una elevada resistencia mecánica y moderada resistencia a la corrosión , están presentes en diferentes aplicaciones como lo son, recipientes que contienen ácidos orgánicos o soluciones salinas, torres de destilación, plataformas de exploración en la industria petrolífera y herramientas de corte entre otras, en 2003 un grupo de profesores (MESA, Dairo H.; SINATORA, Admilton, and TORO, Alejandro.) realizaron un estudio llamado “*resistencia al desgaste erosivo-corrosivo de aceros inoxidables martensíticos con alto contenido de nitrógeno*” , en síntesis estos autores tomaron aceros inoxidables AISI 410 y 410S, los sometieron a un

tratamiento de nitruración gaseosa a 1100°C con un tiempo de sostenimiento de 3 horas y presión de N₂ de 0,5 atm, y realizaron ensayos de desgaste erosivo-corrosivo a diferentes temperaturas, usando un medio acuoso compuesto por agua de mar sintética y partículas de cuarzo. Estos ensayos se le practicaron también al acero AISI 420 tomado como material de comparación. Como conclusiones del estudio, se encontró que los aceros nitrurados 410N y 410SN presentaron mayor resistencia al desgaste erosivo-corrosivo que el acero comercial 420, ensayados bajo los mismos parámetros, adicional a esto la resistencia a la corrosión por picado de los aceros utilizados en este trabajo, fue la propiedad que tuvo mayor influencia sobre el comportamiento de los mismos.

El acero Hadfield lleva este nombre por su descubridor, Sir Robert Hadfield, precursor del desarrollo en la industria de la construcción de maquinarias, dicho material es un acero austenítico de alto manganeso, su principal característica, desde el punto de vista de la composición, es poseer una relación en porcentaje Mn/C > 10, es considerado en la industria como el único material que combina elevada tenacidad-ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación, y una resistencia al desgaste extraordinariamente alta. En 2010 (HIGUERA, Oscar F.; MORENO Carlos M. and GUTIERREZ Manuela.) llevaron a cabo un estudio “*Evaluación de la resistencia al desgaste adhesivo del acero austenítico al manganeso sometido a ciclos térmicos*” en el que básicamente someten un acero (9.4Mn1C1.9Cr1Si) a una serie de tratamientos térmicos de bonificado variando las temperaturas de revenido, y posteriormente realizan a las diferentes probetas un ensayo de desgaste según la norma ASTM G-83-96 (Cilindros cruzados) Los resultados indican que la probeta revenida a 200°C tiene un mayor periodo de endurecimiento por deformación que las revenidas a 400 y 800°C, lo cual la hace más resistente al desgaste, mejorando así las características de la muestra en estado de suministro.

6.3.4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI SAE 4140

Las diferentes familias de microestructuras y fases presentes en un acero hacen las cualidades del mismo, es así como se evidencia que una microestructura es mejor a otra, según un uso determinado, por el año 2010 (ULUTAN, Mustafa; CELIK, Osman N. and GASAN, Hakan.) ingenieros en Turquía realizaron pruebas de desgaste superficial en un acero SAE 4140 sometido a diferentes clases de tratamientos térmicos anteriores para así poder recrear una escena del desgaste en dichas probetas, utilizando como medio abrasivo una rueda giratoria de alta dureza, Los resultados obtenidos en estos estudios reflejan que el acero en condiciones de entrega pierde volumétricamente bastante material sometido a desgaste por su composición micro estructural ferrítico-perlítica, viendo mejores resultados al desgaste en las probetas de aceros tratados térmicamente, pues su condición estructural es de martensita y una porción de austenita retenida. Estos resultados

están ligados a la capacidad de organización de las fases presentes en las probetas siendo más difícil de separar granos más finos y mejor organizados que otros.

Cuando se desean estudiar y comparar características de un material se deben plantear diferentes variables que mejoran o afectan el estudio y a su vez su eficiencia como trabajo investigativo, por el 2009 en México (RODRIGUEZ, E.; FLÓRES, M. and MERCADO, R.) se trabajó con muestras de acero SAE 4140 para determinar su pérdida de volumen bajo condiciones erosivas variando diferentes parámetros como lo son la velocidad de impacto, tamaño del material erosivo, dureza del material erosivo y el ángulo de ataque con que la partícula golpea la probeta del material a estudiar. Evaluando en sus muestras finales parámetros como la pérdida volumétrica, los límites de grano en la zona afectada por las partículas y diferentes análisis fractográficos de las diferentes probetas. Hallando condiciones en el material tratado bastante peculiares, ya que se encontró que impactando la probeta con un ángulo menor a 30° , las partículas más blandas son las que dejan mayor huella en el material y por ende mayor pérdida en volumen, hacia ángulos medios entre 40° a 60° no se evidencia cambios y se dice que la dureza del material de impacto no influye, En ángulos mayores pasa lo contrario siendo las partículas más duras las que hacen un mayor desgaste en las probetas generando cráteres superficiales que van ligados a la propagación de grietas y a la pérdida de material demostrando que a mayor dureza se aumenta la fragilidad de los materiales.

6.4 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

- ASTM G40: Standard Terminology Relating to Wear and Erosion (terminología estándar relativa al desgaste y a la erosión) esta norma trata los términos y definiciones de la terminología relacionada con el desgaste y la erosión de los cuerpos sólidos debido a las interacciones mecánicas. Basados en ella se hará una guía práctica de la máquina de ensayo de desgaste erosivo por partículas solidas.
- ASTM G76: (Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets) Método de prueba estándar para realización de pruebas de erosión por pinzamiento de partículas sólidas usando chorros de gas. Se utilizará para parametrizar la construcción de la máquina. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.
- NTC 5613: Norma Técnica colombiana para referencias bibliográficas. Contenido. Forma y estructura. Instrumento de normalización que sirve para presentar las citas y referencias en la escritura de artículos científicos, trabajos de grado, tesis y otros tipos de publicaciones.
- NTC 1486: Norma técnica colombiana para documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Enfatiza en los aspectos formales de la presentación.

7 DISEÑO METODOLÓGICO

7.1 ANALISIS NORMA

La norma ASTM G76 anexa a este documento, tiene como alcance determinar la pérdida de material por la erosión del impacto de partículas sólidas arrastradas por un gas en equipos de erosión de tipo boquilla de chorro (citado de la norma ASTM G76), esto permite medir la erosión por partículas sólidas en diferentes materiales y clasificar las diferentes tasas de erosión para materiales en entornos simulados.

En la norma se tiene en cuenta diferentes parámetros que intervienen en el ensayo, como lo son, el tamaño de las partículas, la dureza de las mismas, velocidad, presión, ángulos de ataque etc. Por lo tanto no será suficiente realizar una sola prueba de laboratorio para evaluar el rendimiento esperado en los diferentes materiales.

7.2 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Se aplica una corriente de gas a una presión determinada para acelerar el flujo de partículas sólidas a través de una boquilla hacia la probeta del material a evaluar.

Según la norma se deben tener en cuenta:

- El ángulo de impacto de las partículas con la probeta
- La distancia entre la boquilla del sistema de inyección de partículas y la probeta
- La velocidad de las partículas
- La presión dentro del sistema de inyección
- El acabado interior de las piezas que conforman el sistema de inyección
- La geometría de dichas piezas

La norma sugiere que el ensayo sea realizado en probetas de (Acero SAE 1020), especifica que composición química debe tener y el rango de dureza, aclara que el uso de un acero diferente da lugar a resultados diferentes.

Para la geometría de la boquilla la norma es muy clara en cuanto a sus dimensiones, la relación longitud diámetro debe ser 25:1 o mayor con el fin de lograr la velocidad esperada, la norma recomienda que la boquilla se fabrique en un tubo de 1,5 mm de diámetro interior, 50 mm de largo en un material resistente a la erosión y sugiere WC o Al_2O_3 .

La norma también establece que el sistema de alimentación de partículas debe trabajar de manera uniforme respecto a la corriente del gas, y solicita un método para medir la velocidad de las partículas en el momento en que se lleva a cabo el ensayo, sugiere fotografía de alta velocidad o un velocímetro laser.

Como condiciones de prueba la norma establece los siguientes parámetros:

- El tubo de la boquilla es de 1,5 mm \pm 0,075 mm de diámetro interior mínimo 50 mm de longitud
- El gas de prueba será aire seco, -50°C punto de rocío o menor
- Las partículas abrasivas deberán ser de Al_2O_3 (óxido de Aluminio) con un tamaño de 50 micras y de forma angular, solo se debe utilizar una vez.
- La velocidad de partícula debe ser 30 ± 2 m/s tomada en la superficie de la probeta, la velocidad de flujo será aproximadamente 8 L/min.
- La presión del sistema debe ser aproximadamente 140 kPa (20 psig), aunque ésta depende del diseño del sistema.
- El tiempo de duración del ensayo será de 10 minutos para conseguir unas condiciones estables, tiempos más largos son permisibles pero el cráter causado por la erosión no debe superar una profundidad de 1 mm
- El ángulo entre el eje de la boquilla y la superficie de la probeta será $90 \pm 2^{\circ}$.
- El ensayo se debe llevar a cabo a una temperatura ambiente
- La velocidad de alimentación de partículas será $2,0 \pm 0,5$ g/min
- La distancia desde la superficie de la probeta a la boquilla será de 10 ± 1 mm.

La norma también establece un procedimiento para llevar a cabo el ensayo:

- Establecer y medir la velocidad de las partículas y el flujo de partículas especificado antes de introducir las probetas de ensayo
- Preparar la superficie de la probeta para lograr uniformidad y buen acabado, se recomienda que la superficie tenga una rugosidad de 1 micra o menor. Se debe pesar en una balanza analítica de 0,01 mg de precisión.
- Montar la probeta en el equipo en la ubicación y la orientación adecuada. Someter la probeta al impacto de partículas para un intervalo de tiempo seleccionado, medido con precisión de 5 s.
- Sacar la muestra, limpiar cuidadosamente, volver a pesar y calcular la pérdida de masa.
- Repetir el proceso para determinar al menos 4 puntos durante un tiempo total de al menos 10 minutos y trazar esos valores como la pérdida de masa en función del tiempo transcurrido. Tiempos adecuados serían 2, 4,8 y 16 minutos para un material tal como tipo 1020 de acero.

7.3 CONSTRUCCIÓN DEL TRIBÓMETRO

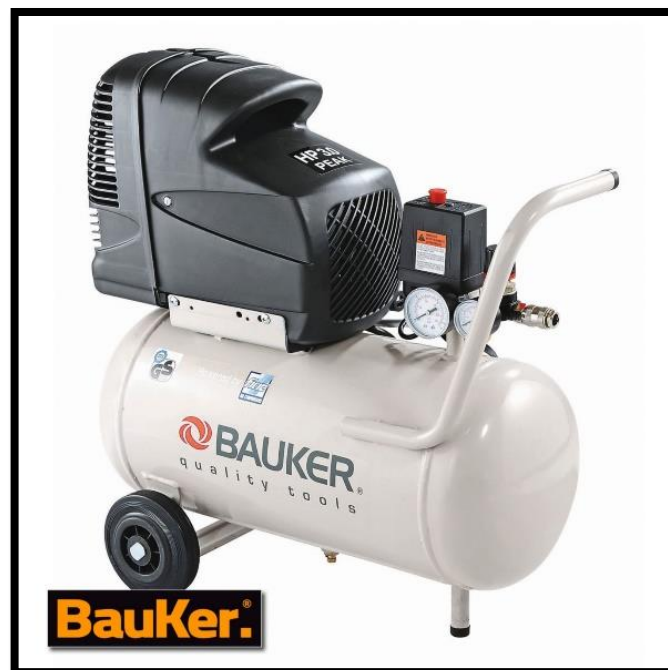
Según la norma ASTM G76 en el equipo tipo tribómetro se deben impulsar partículas sólidas por una corriente de gas y de esa manera impactar la superficie de un material objeto del ensayo de desgaste, para explicar por segmentos los diferentes conjuntos de piezas que conforman la máquina hablaremos en primer lugar del conjunto entrada de aire, en segundo lugar conjunto suministro de partículas sólidas, en tercer lugar conjunto de disparo de la mezcla. También se encuentra en cuarto lugar el área de erosión.

7.3.1 CONJUNTO DE ENTRADA DE AIRE

Según la norma, el aire debe mantenerse dentro del sistema a una presión de 20 psi aproximadamente.

Inicialmente se quiso trabajar con el aire suministrado por la línea de aire presurizado que posee el laboratorio de Neumática ubicado en la Universidad Libre, por cuestiones de ubicación y disponibilidad no fue posible hacer uso de dicha línea; en vista de esto la Universidad libre proporcionó a los autores el permiso para hacer uso de un compresor ubicado en el Laboratorio de Molinos de la misma.

Ilustración 1 Compresor



Fuente: BAUKER

Tabla 1 Características compresor

Características Compresor	
ATRIBUTO	DETALLE
Potencia Máxima	2 HP
Capacidad	25 Litros
Material	Metal
Velocidad	3400 RPM
Voltaje	110 v
Presión PSI	116
Caudal/ minuto	6 CFM

Ya que el compresor que nos proporcionó la universidad supera la presión de trabajo específica en la norma, se hizo necesario la adquisición y compra de un equipo regulador de presión con filtro de aire/condensado, que garantiza la presión óptima del ensayo.

Ilustración 2 Regulador de presión



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 2 Características regulador de presión

Características
Instalación sencilla
Conectores de 6 mm (1/4") BSP hembra
Depósito de acumulación de agua de 150 ml
Presión de trabajo de hasta 10 Bares o 154 PSI

Para hacer la conducción del aire desde el compresor al conjunto de mezcla, se utilizaron las siguientes piezas:

- Acople rápido 1/4"
- Manguera de 1/4"x 2m
- Manguera de 1/4"x 0.5m
- Racor de 1/4"x 3 unidades
- Abrazaderas de 1/4"x 4 unidades

7.4 CONJUNTO SUMINISTRO DE PARTÍCULAS

Según la norma el suministro de material abrasivo debe hacerse a un flujo constante de 2 ± 0.5 g/min. El conjunto suministro de partículas está compuesto por 6 piezas:

7.4.1 Tolva de almacenamiento

Ilustración 3 Tolva de almacenamiento



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 3 Características Tolva de almacenamiento

Características	
Material	Polietileno
Capacidad	1200 gm
Rosca de salida	½ ”

7.4.2 Válvulas de bola de ½” x 2 unidades.

Ilustración 4 Válvula de paso de material



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 4 Características válvula de paso de material

Características	
Material	Acero
Tipo válvula	Bola
Rosca de salida	1/2 "

7.4.3 Niple de 1/2" x 4".

Ilustración 5 Niple



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 5 Características niple

Características	
Material	Acero
Longitud	25 cm
Rosca de entrada y salida	1/2 "

7.4.4 Cono de suministro (Fabricado en acero inoxidable AISI 316)

Ilustración 6 Cono de suministro



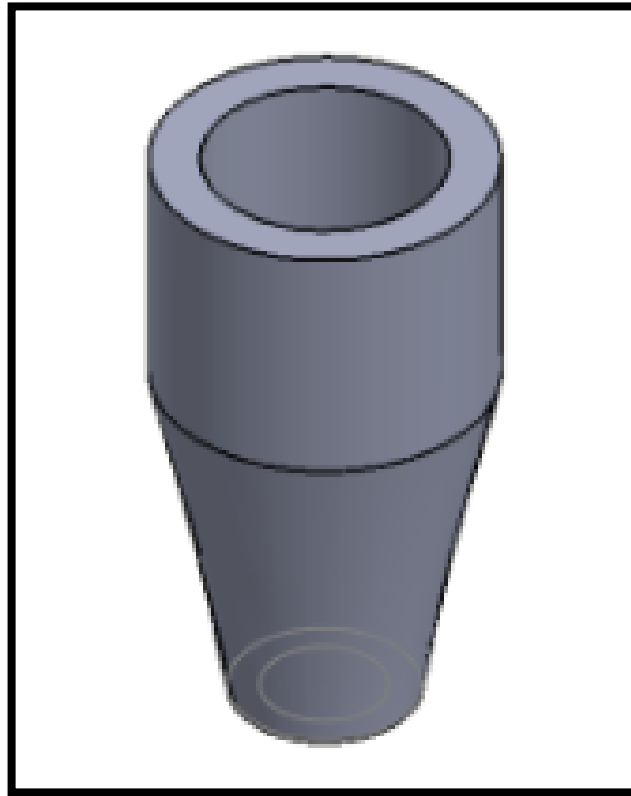
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 6 Características cono de suministro

Características	
Material	Acero inoxidable 316
Dimensiones	Plano anexo

7.4.5 Cono reductor (Fabricado en acero inoxidable AISI 316)

Ilustración 7 Cono reductor



Fuente: autores del proyecto

Tabla 7 Características Cono reductor

Características	
Material	Acero inoxidable 316
Dimensiones	Plano anexo

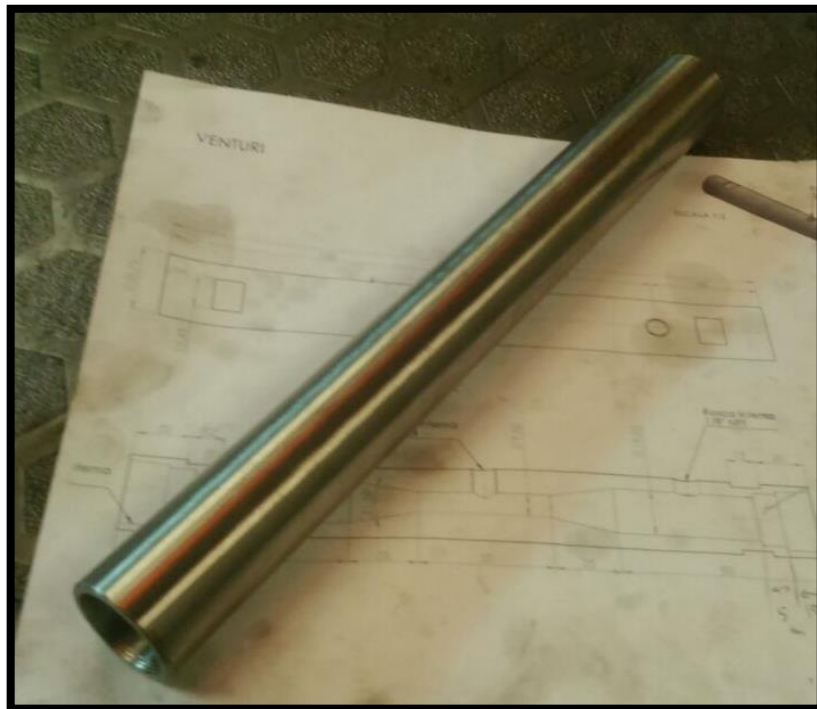
Se utilizaron dos válvulas para permitir el llenado del niple de partículas sólidas y cerrar el sistema para no tener pérdidas de presión de aire.

7.5 CONJUNTO DE DISPARO DE LA MEZCLA

En este sistema se encuentran tres piezas fundamentales y una secundaria:

- 7.5.1 Tubo Venturi (Fabricado en acero inoxidable AISI 316)
- 7.5.2 Tubo Acople a conjunto de entrada de aire (Fabricado en acero inoxidable AISI 316)
- 7.5.3 Boquilla (Fabricado en acero inoxidable AISI 316)
- 7.5.4 Manómetro de presión, se decide colocar a la salida del venturi para garantizar la presión recomendada por la norma de 20 Psi.

Ilustración 8 Tubo venturi

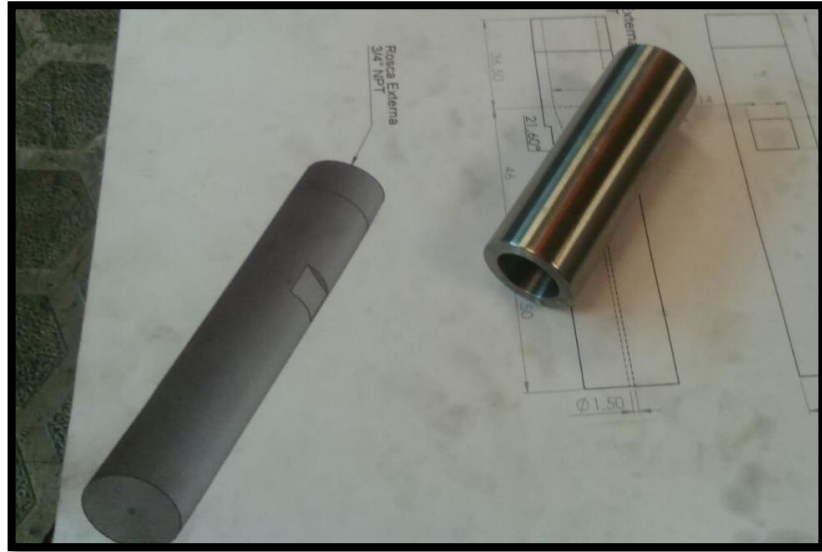


Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8 Características tubo venturi

Características	
Material	Acero inoxidable 316
Dimensiones	Plano anexo

Ilustración 9 Boquilla



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 9 Características boquilla

Características	
Material	Acero inoxidable 316
Dimensiones	Plano anexo

Estas piezas fueron fabricadas en acero inoxidable AISI 316, un material capaz de resistir las condiciones de extremo desgaste como son, el movimiento entre una mezcla de aire y partículas sólidas, garantizando por su composición química y dimensiones, que los materiales perdurarán a lo largo de cada uno de los ensayos realizados por la máquina que se construyó.

Para el diseño del tubo Venturi se realizó una serie de cálculos para encontrar el diámetro interior adecuado, que proporcione la presión de trabajo necesaria sugerida por la norma de 20 psi.

7.5.5 CALCULOS DEL VENTURI

El proceso de fabricación de esta pieza se debió llevar a cabo por el método de electroerosión, y para esto se realizó una serie de cálculos.

Para empezar se tomaron las variables conocidas,

Tabla 10 Variables para el diseño de venturi

VARIABLE	VALOR
Presión [P], sugerida por la norma ASTM G76	20 Psi
Velocidad de la partícula [v], sugerida por la norma ASTM G76	30 m/s
Caudal del gas [Q], generado por el compresor	6 CFM

Como incógnitas se tienen el Área transversal de la garganta del tubo [A], y por consiguiente el Diámetro interior del tubo Venturi [D]

Reemplazando los valores obtenemos que:

Tabla 11 Cálculos del venturi

Caudal	$Q = 6 \frac{ft^3}{min} = 0,00283168 \frac{m^3}{s}$
Área	$A = \frac{Q}{V} = \frac{0,00283168 \frac{m^3}{s}}{30 \frac{m}{s}} = 0,000094389 m^2$
Diámetro	$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0,000094389 m^2}{\pi}} = 0,01096 m$

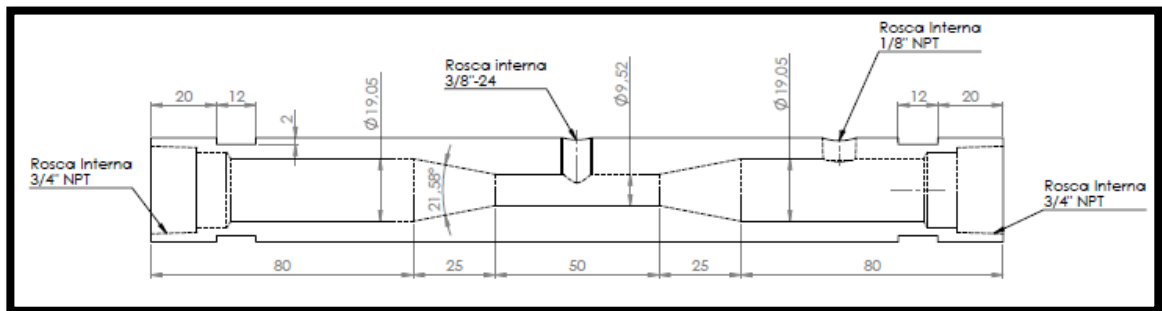
Fuente: Autores del proyecto

Como se puede observar, teóricamente el diámetro de la garganta debe ser de 10,96 mm, al realizar la cotización, se entiende que la electroerosión se debe hacer con electrodos comerciales, los valores más cercanos al diámetro teórico son electrodos de 3/8" y 7/16", por cuestiones de costos se toma la decisión de realizar la garganta del tubo Venturi a un diámetro de 3/8".

En la literatura se encontró (GRUPO DE HIDRAULICA RURAL Y URBANA IMTA, Diciembre, 2001) como parámetro adicional que la sección de entrada del Venturi tiene diámetro igual al diámetro de la tubería y una sección cónica convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta, según este documento el ángulo de la pendiente debe ser de 21°, para lograr un diámetro que cumpliera con este requisito, se seleccionó un electro de 3/4"; en la siguiente figura se muestra el plano que se entregó al fabricante para realizar la pieza más crítica del tribómetro, el tubo Venturi (ver anexo, plano N°9, Tubo Venturi).

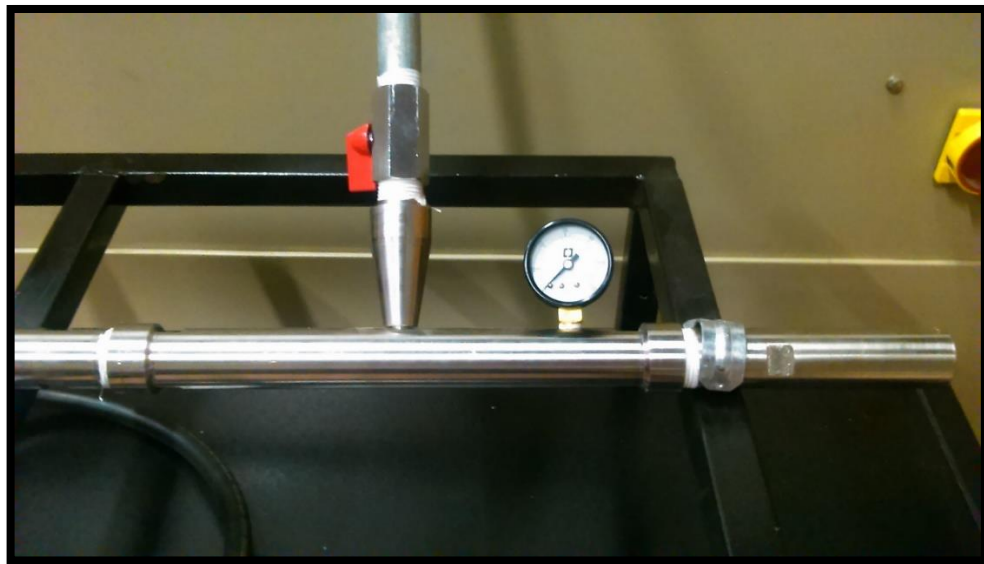
Debido a las condiciones de fabricación especiales, tales como Mecanizados y Electroerosión de cada una de las partes anteriormente mencionadas, se diseñaron unos planos con las dimensiones requeridas, para un óptimo funcionamiento de la maquina en el ensayo, además se llevó a cabo una selección de materiales y proveedores de acuerdo al análisis, de diferentes cotizaciones realizadas por los autores del proyecto; los planos y las cotizaciones, se encuentran como anexo a este documento.

Ilustración 10 Venturi



Fuente: Autores del proyecto

Ilustración 11 Conjunto de disparo de la mezcla



Fuente: Autores del proyecto

7.6 ÁREA DE EROSIÓN

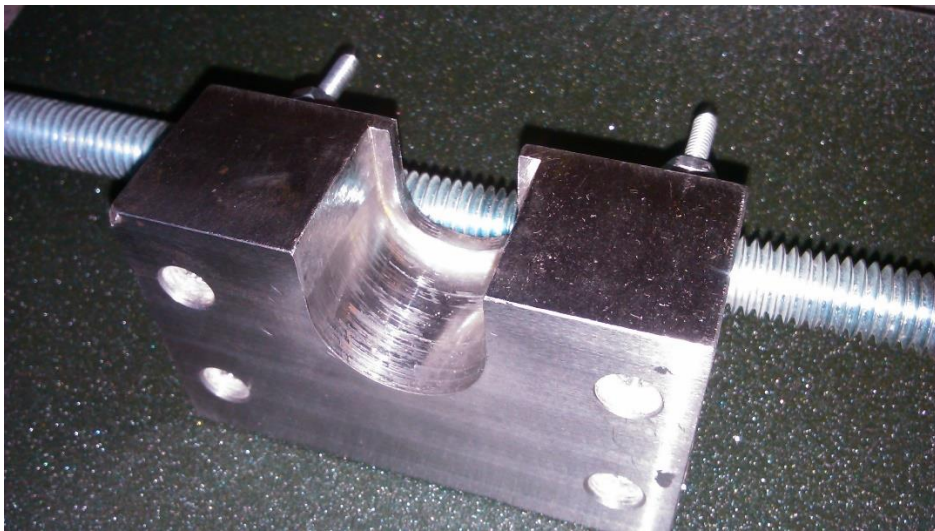
En esta área se realiza el desgaste en la superficie de la probeta a tratar dicha probeta se debe ubicar en un sistema de posicionamiento y orientación fabricado por los autores que se denominará Porta-probetas, fabricado en acero hot rolled, bajo dimensiones específicas. Ver plano anexo.

Ilustración 12 Fabricación porta-probetas



Fuente: Autores del proyecto

Ilustración 13 Porta-probetas



Fuente: Autores del proyecto

Al igual se fabricó una estructura en acero de tubo cuadrado de 1” que tiene como función, evitar el esparcimiento de partículas sólidas en el aire consecuencia de la realización del ensayo. El área está cubierta con paneles de vidrio que garantizan que las partículas solo puedan salir por los ductos de salida establecidos por los autores.

Ilustración 14 Área de erosión



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 12 Características área de erosión

Características	
Material estructura	Acero
Material Laterales	Vidrio
Conexión a estructura	Tornillo estrella
Dimensiones	Plano anexo

7.7 ESTRUCTURA

Para dar un soporte y consistencia a cada uno de los conjuntos que constituyen la maquina se diseñó y fabrico una estructura en acero de perfil cuadrado de 1", con medidas necesarias para una cómoda distribución y uso de los componentes. También se construyó en la estructura una bodega de almacenaje con diferentes usos tales como, guardar las partículas sólidas necesarias en los ensayos, guardar el manual de uso y mantenimiento del equipo, también los utensilios necesarios para llevar a cabo dicho mantenimiento, etc.

Ilustración 15 Estructura



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 13 Características estructura

Características	
Material	Acero
Dimensiones	Plano anexo

Ilustración 16 Tribómetro



Fuente: Autores del proyecto

7.8 MATERIAL PARA EROSIÓN

La norma ASTM G-76 recomienda realizar el ensayo de desgaste erosivo utilizando como partículas sólidas óxido de aluminio (Al_2O_3), con un tamaño de grano de 50 micras.

Siguiendo la recomendación de la norma se utilizó Alúmina en malla 325 (44 micras), sin obtener buenos resultados, a pesar de realizar un esfuerzo por adquirir dicho material, éste no generó el comportamiento deseado en cuanto a su función dentro del tribómetro, como se demostró en el numeral anterior, el diseño del equipo se hizo siguiendo las recomendaciones de la norma, sin embargo la alúmina por sus características físicas, generó atascamiento tanto en el área de mezcla como en la tolva, impidiendo un disparo continuo de las partículas. Haciendo frente a este percance se decidió utilizar otro tipo de partícula sólida que pudiera reemplazar la recomendada por la norma, llevando a cabo una revisión bibliográfica y en vista de que el ensayo de desgaste erosivo es muy similar al proceso de sand-blast (Alvaro M. TREVIÑO A., 2001) se tomó la decisión de utilizar Arena convencional que cumpliera con el tamaño de partícula, recomendado por la norma; obteniendo un buen funcionamiento del tribómetro en cuanto a la mezcla Aire/material erosivo y un flujo de partícula continuo, permitiendo así realizar el ensayo bajo los tiempos que recomienda la norma.

Ilustración 17 Tamiz



Fuente: autores del proyecto

Ilustración 18 Malla 200 - 75 micras



Fuente: autores del proyecto

Tabla 14 Características Tamiz

Características	
Marca	Endecotts
Dimensión de la apertura	75 micras
Malla #	200
Material de la malla	Acero inoxidable
Norma	ASTM E11
Pertenece a	Universidad Libre

Tabla 15 Características de la arena

Características	
Material	Arena
Tamaño de partícula	75 micras
Dureza	750-1200 HV

7.9 ALISTAMIENTO DE PROBETAS

En el alcance de este proyecto está bien definido el material objeto del estudio, acero AISI SAE 4140.

7.9.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA

Basado en la espectrometría anexa a este documento.

Tabla 16 Componentes químicos presentes en el acero AISI SAE 4140

ESPECTROMETRÍA					
Elemento	QUEMA 1	QUEMA 2	QUEMA 3	QUEMA 4	PROMEDIO
Fe	97,418	97,441	97,387	97,392	97,4095
Si	0,178	0,179	0,186	0,189	0,183
Mo	0,174	0,172	0,175	0,18	0,17525
Al	0,029	0,03	0,03	0,028	0,02925
C	0,376	0,362	0,372	0,377	0,37175
Cu	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
W	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Nb	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Mn	0,781	0,775	0,793	0,789	0,7845
Ni	0,016	0,016	0,017	0,017	0,0165
Co	0,005	0,005	0,006	0,005	0,00525
B	0,0002	0,0014	0,0003	0,0004	0,000575
P	0,006	0,007	0,008	0,01	0,00775
Cr	0,989	0,984	0,995	1,013	0,99525
Ti	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Pb	0,005	0,006	0,007	0,007	0,00625
S	0,005	0,005	0,006	0,007	0,00575
V	0,002	0,002	0,003	0,003	0,0025
Sn	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mg	0	0	0	0	0

Fuente: Autores del proyecto

7.9.2 CÁLCULO DE TEMPERATURAS CRÍTICAS

Tabla 17 Formulas Temperaturas críticas

Formulas cálculo de temperaturas críticas según <i>Kasatkin</i>	
AC1	$723 - 7.08 \text{ Mn} + 37.7 \text{ Si} + 18.1 \text{ Cr} + 44.2 \text{ Mo} + 8.95 \text{ Ni} + 50.1 \text{ V} + 21.7 \text{ Al} + 3.18 \text{ W} + 297 \text{ S} - 830 \text{ N} - 11.5 \text{ C Si} - 14 \text{ Mn Si} - 3.1 \text{ Si Cr} - 57.9 \text{ C Mo} - 15.5 \text{ Mn Mo} - 5.28 \text{ C Ni} - 6 \text{ Mn Ni} + 6.77 \text{ Si Ni} - 0.8 \text{ Cr Ni} - 27.4 \text{ C V} + 30.8 \text{ Mo V} - 0.84 \text{ Cr}^2 - 3.46 \text{ Mo}^2 - 0.46 \text{ Ni}^2 - 28 \text{ V}^2$
AC3	$912 - 370 \text{ C} - 27.4 \text{ Mn} + 27.3 \text{ Si} - 6.35 \text{ Cr} - 32.7 \text{ Ni} + 95.2 \text{ V} + 190 \text{ Ti} + 72 \text{ Al} + 64.5 \text{ Nb} + 5.57 \text{ W} + 332 \text{ S} + 276 \text{ P} + 485 \text{ N} - 900 \text{ B} + 16.2 \text{ C Mn} + 32.3 \text{ C Si} + 15.4 \text{ C Cr} + 48 \text{ C Ni} + 4.32 \text{ Si Cr} - 17.3 \text{ Si Mo} - 18.6 \text{ Si Ni} + 4.8 \text{ Mn Ni} + 40.5 \text{ Mo V} + 174 \text{ C}^2 + 2.46 \text{ Mn}^2 - 6.86 \text{ Si}^2 + 0.322 \text{ Cr}^2 + 9.9 \text{ Mo}^2 + 1.24 \text{ Ni}^2 - 60.2 \text{ V}^2$

Fuente: STEEL FORMING AND HEAT TREATING HANDBOOK (Antonio A. GORNI, 2012)

Reemplazando con los valores promedio encontrados en la espectrometría realizada al acero, se hallan las temperaturas Ac1 y Ac3.

Tabla 18 Temperaturas críticas del acero AISI SAE 4140

AC1	742,422916°C
AC3	796,818526°C

Fuente: Autores del proyecto

Los valores encontrados en la bibliografía y la ficha técnica de diferentes comercializadores de aceros, muestran valores de temperaturas intercríticas, para el acero AISI SAE 4140, Ac1 alrededor de los 750°C y el valor de Ac3 por los 790°C, con esto, se corroboran las temperaturas en el acero escogido para la investigación, estableciendo las temperaturas para los tratamientos térmicos a realizar.

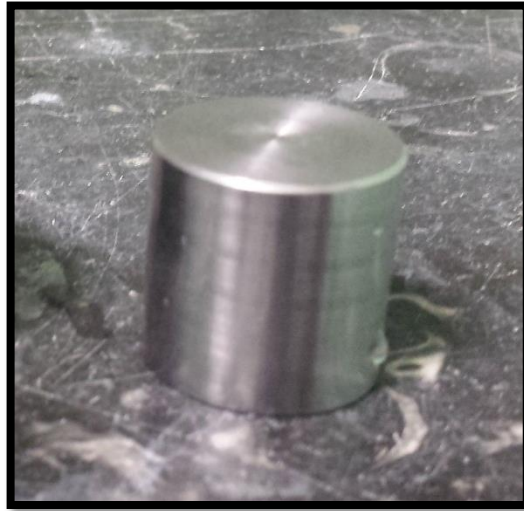
La norma recomienda utilizar probetas rectangulares tipo lámina de (30 x 10) mm y 2 mm de espesor, sin embargo los autores decidieron realizar en el tribómetro un porta-probetas para una muestra cilíndrica de 1" de longitud por 1" de diámetro, ya que en el mercado es asequible comprar aceros en barras de 1 pulgada de diámetro, con esto se evitó el mecanizado de las láminas recomendadas por la norma y se realizó un corte metalográfico con posterior refrentado para garantizar superficies perpendiculares al eje de la barra.

7.9.3 TEMPLE Y REVENIDO

La población total de probetas mecanizadas, se divide en tres grupos:

- Probetas en estado normalizado (como se recibe el material de fábrica)

Ilustración 19 Probeta normalizada



Fuente: autores del proyecto

Tabla 19 Características Probeta normalizada

Características		
Material	Acero AISI SAE 4140	
Dimensiones	Longitud	1"
	Diámetro	1"

Fuente: Autores del proyecto

- Probetas templadas: Se llevó a cabo un temple en agua a temperatura de 900°C con un tiempo de sostenimiento de 33 minutos, en una mufla de calentamiento marca VULCAN D-550.

Ilustración 20 Mufla VULCAN D-550



Fuente: autores del proyecto

Ilustración 21 Control de temperatura



Fuente: autores del proyecto

Tabla 20 Características mufla

Características	
Marca	VULCAN
Modelo	D-550
Rango	20 – 1600°C
Resolución	0.01°C

Ilustración 22 Proceso de temple

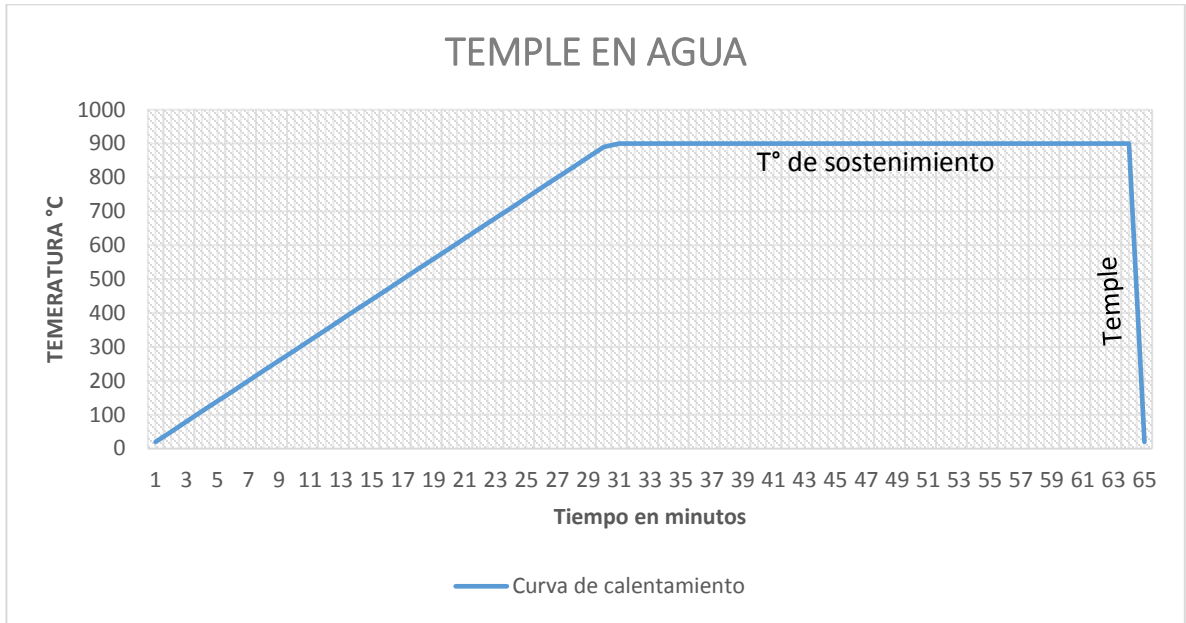


Fuente: autores del proyecto

Tabla 21 Características proceso de temple

Características	
Proceso	Temple
Medio de enfriamiento	Agua
Rata de calentamiento	30°C/min
Tiempo de sostenimiento	33 min

Ilustración 23 Curva de temple



Fuente: Autores del proyecto

- Probetas revenidas: debido que el revenido es un tratamiento térmico que se lleva a cabo después de un temple, a este grupo de probetas también fue sometido a un temple en agua a temperatura de 900°C con un tiempo de sostenimiento de 33 minutos, en una mufla de calentamiento marca VULCAN D-550. Posteriormente se le realizó un revenido al aire a 600°C con un tiempo de sostenimiento de 60 minutos, en la misma mufla.

Ilustración 24 Proceso de revenido

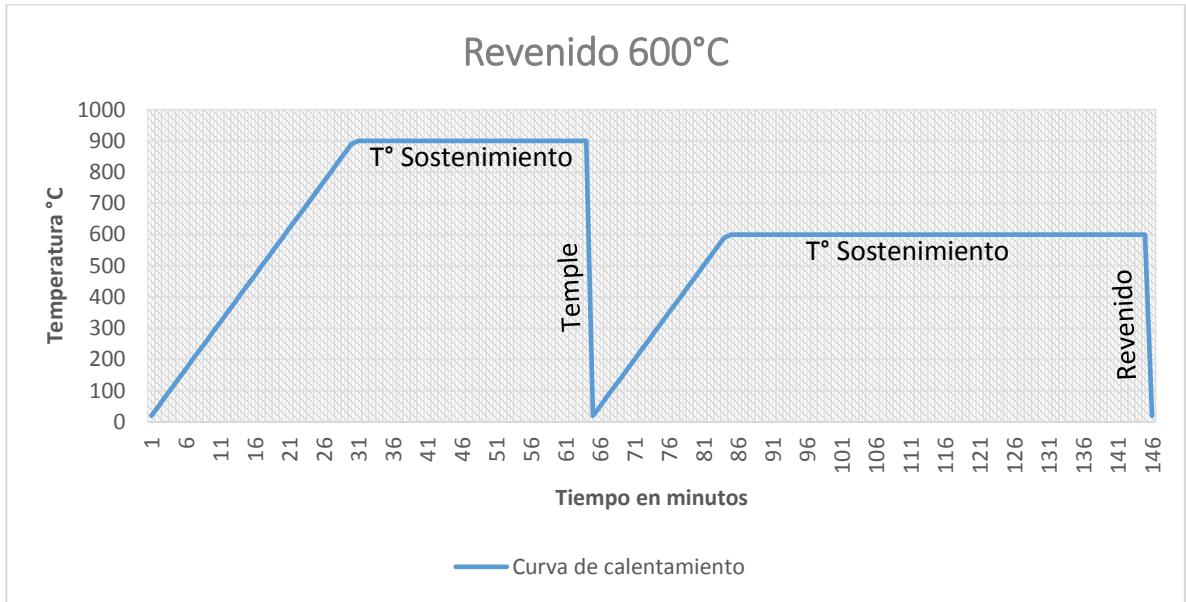


Fuente: Autores del proyecto

Tabla 22 Características proceso de revenido

Características	
Proceso	Revenido
Medio de enfriamiento	Agua
Rata de calentamiento	30°C/min
Tiempo de sostenimiento	60 min

Ilustración 25 Curva de revenido



Fuente: Autores del proyecto

7.10 ANALISIS DE MASA

Posterior al alistamiento de las probetas se procedió a realizar una medición de masa por probeta, de cada muestra de la población, ya que lo que se espera al realizar el ensayo es obtener una pérdida parcial de masa en las superficies de las probetas a analizar, las mediciones se hicieron en una balanza marca SARTORIUS AZ310 de capacidad de pesado hasta 3100gm como lo recomienda la norma por su resolución $d = 0,01\text{gm}$.

Ilustración 26 Balanza SARTORIUS

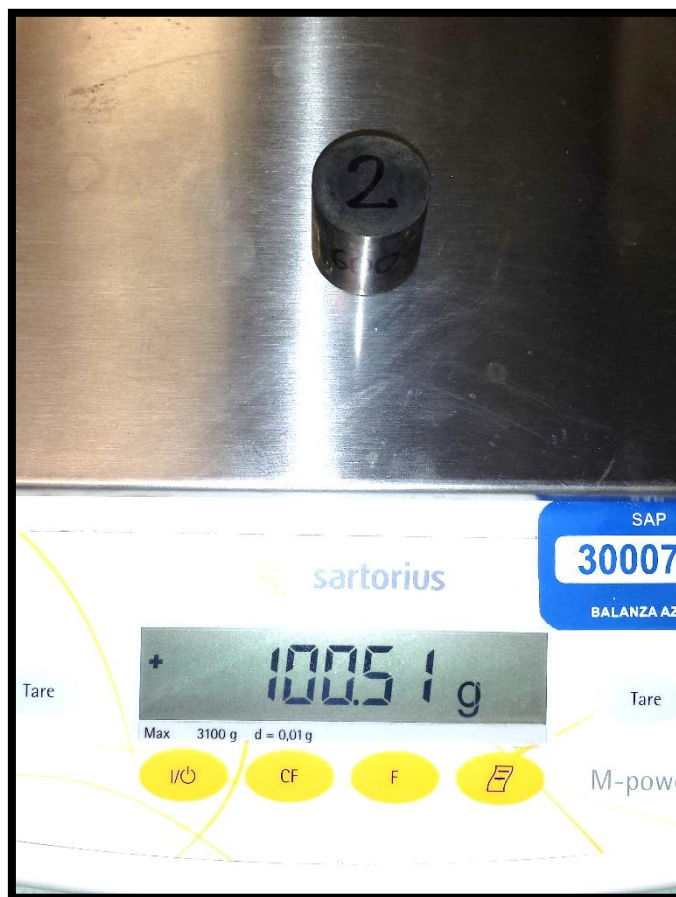


Fuente: autores del proyecto

Tabla 23 Características balanza

Características	
Marca	SARTORIUS
Modelo	AZ3102
Rango de medición	0-3100gm
Estado	Calibrada
Resolución	0.01gm

Ilustración 27 Medición de masa



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 24 Características medición de masas por probeta

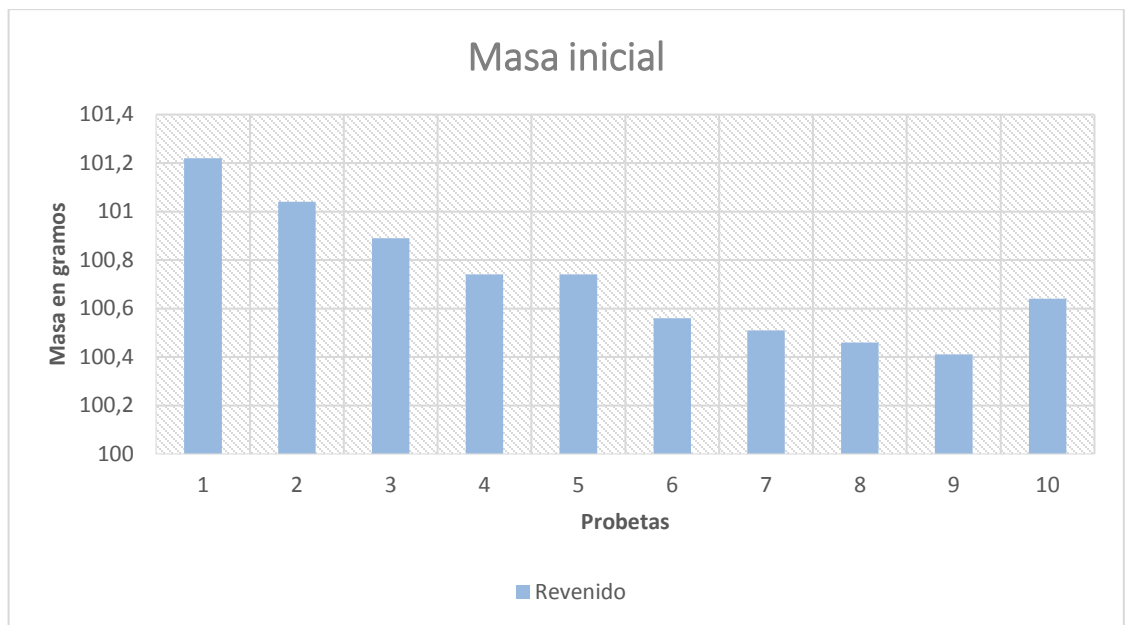
Características	
Ubicación probeta	Centro
Tiempo de medición	30 s
Informe	Anexo

Tabla 25 Masa de las probetas del grupo revenido

REVENIDO 600°C	
Probeta	Masa (gr)
1	100,22
2	100,51
3	100,56
4	100,41
5	100,74
6	100,74
7	100,46
8	101,04
9	99,61
10	100,89

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 26 Masa inicial por probeta del grupo Revenido 600°C



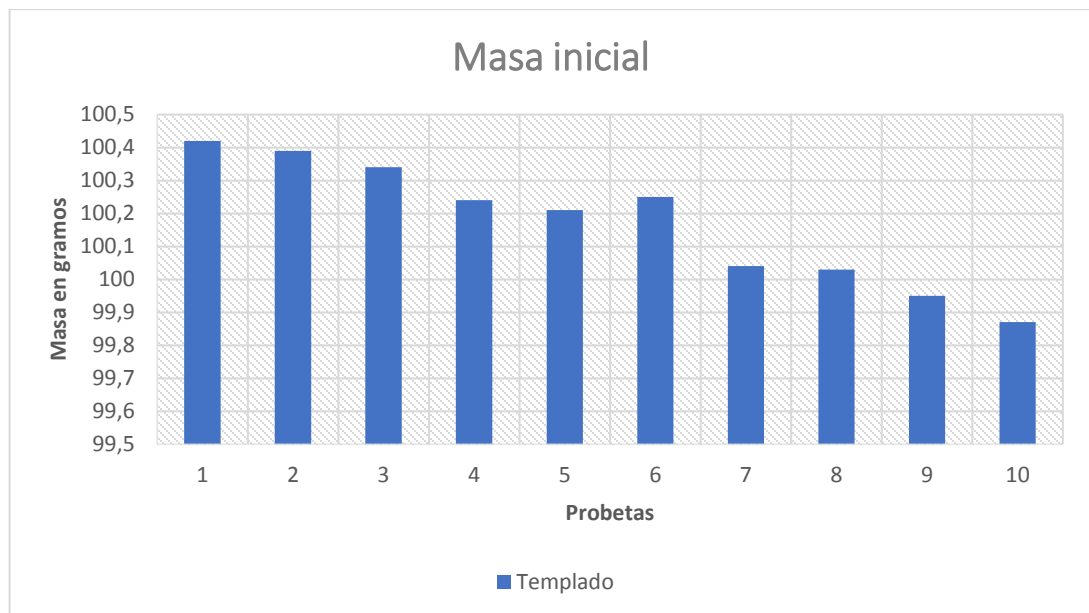
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 27 Masa de las probetas del grupo temple

TEMPLE 900°C	
Probeta	Masa (gr)
1	99,88
2	100,21
3	100,21
4	99,95
5	100,03
6	99,87
7	100,04
8	100,24
9	100,34
10	100,39

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 28 Masa inicial por probeta del grupo Temple 900°C



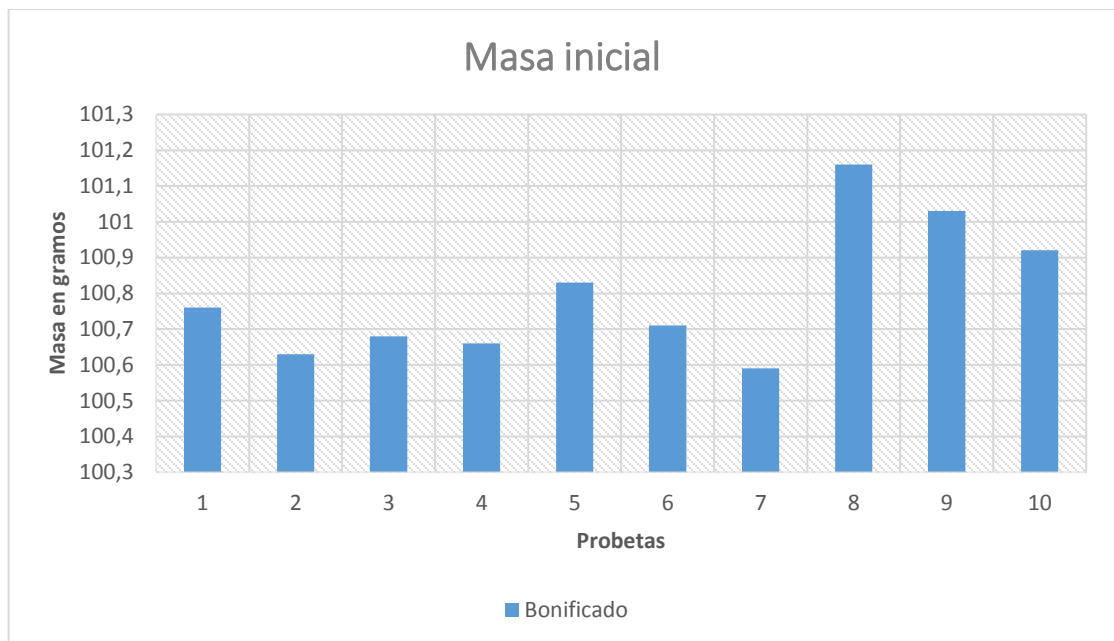
Fuente: Autores del proyecto

Tabla 29 Masa de las probetas grupo Bonificado

BONIFICADO	
Probeta	Probeta
1	100,34
2	100,63
3	100,68
4	100,66
5	100,83
6	100,71
7	100,59
8	101,16
9	101,03
10	100,92

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 30 Masa inicial por probeta del grupo Bonificado

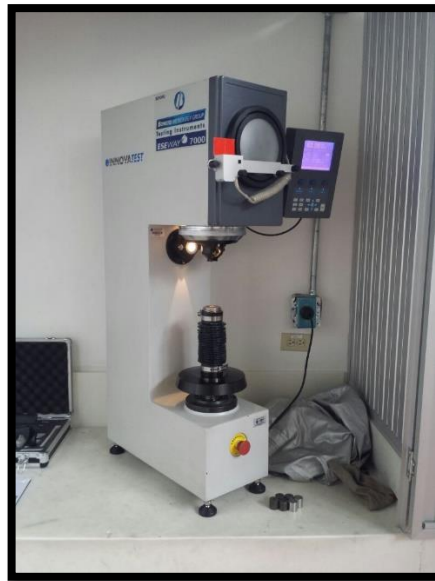


Fuente: Autores del proyecto

7.11 ENSAYO DE DUREZA:

Para corroborar los tratamientos térmicos realizados en las probetas, éstas fueron sometidas a una medición de dureza, haciendo uso del equipo durómetro de la universidad libre ubicado en los laboratorios de la facultad de ingeniería, obteniendo los siguientes valores:

Ilustración 28 Durómetro



Fuente: Autores del proyecto

Tabla 31 Durezas por probeta

Durezas HRC			
Probeta	Bonificado	Revenido	Templado
1	30,55	28,42	44,37
2	30,4	28,67	46,95
3	30,25	28,72	43,95
4	31,04	29,27	45,05
5	30,46	29,52	44,63
6	30,82	29,65	45,87
7	30,42	28,87	45,13
8	30,74	29,12	45,82
9	30,69	28,96	43,69
10	30,66	29,4	44,87

Fuente: Autores del proyecto

7.12 PROCEDIMIENTO ENSAYO DE DESGASTE

7.12.1 Calibración de presión

Antes de realizar cualquier prueba se debe purgar el filtro de humedad del regulador de presión, con el fin de evitar que ingrese humedad al tribómetro. Luego verificar el correcto cierre de las válvulas de alimentación de partículas, encender el compresor y verificar en los manómetros de entrada al regulador de presión y de salida del Venturi que se cumpla con la presión establecida para el ensayo de 20 psi, por recomendación de la norma.

7.12.2 Realización del ensayo

Como primera medida se coloca la arena en partículas de 50 micras en la tolva de almacenamiento, teniendo en cuenta que las válvulas estén cerradas, posteriormente se debe colocar la muestra a desgastar en el porta-probetas, verificando su correcta distancia entre la superficie y la punta de la boquilla del sistema de disparo, según indica la norma, igualmente se debe verificar el ángulo de impacto deseado, que para el ensayo realizado es de 90° respecto al eje de la boquilla, se debe revisar que no haya juego entre la muestra y el porta-probetas. Luego se debe cerrar la cabina de erosión del tribómetro para evitar la propagación de material particulado en el aire del lugar de trabajo.

Para dar inicio al ensayo de desgaste se debe encender el compresor tomando las mediciones de tiempo 10 segundos después de encendido el equipo; Durante el tiempo de desgaste el flujo de las partículas debe ser continuo, una vez finalizado el tiempo de ensayo, se retira la probeta para pesarla en la balanza, de la misma manera que se hizo antes del ensayo, con el fin de obtener el diferencial de masa en cada probeta, los tiempos de duración del ensayo relacionados con los diferentes grupos de probetas, se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 32 Disposición de tiempos para el ensayo de desgaste

Grupo \ Tiempo	Tiempo 1	Tiempo 2	Tiempo 3	Tiempo 4
Normalizado	0 min	4 min	6 min	8 min
Templado	0 min	4 min	6 min	8 min
Revenido	0 min	4 min	6 min	8 min

Fuente: Autores del proyecto

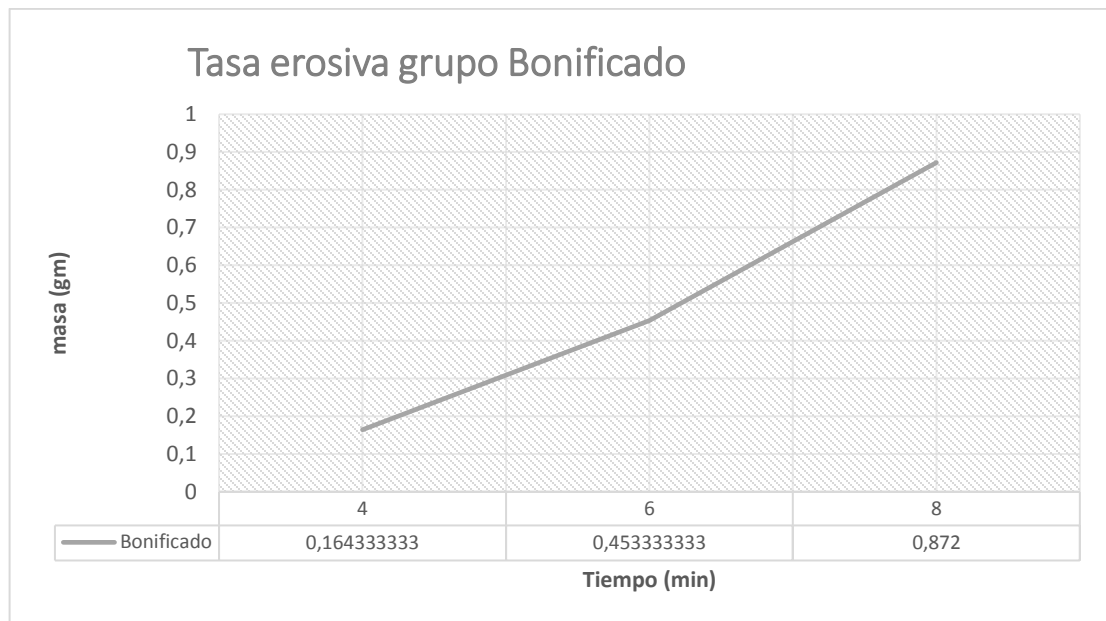
Anexo a este documento se encuentra un manual de uso y mantenimiento del tribómetro fabricado por los autores, en este se explica de manera específica el paso a paso del ensayo, incluyendo el procedimiento de limpieza posterior a cada ensayo.

8 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

8.1 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos al realizar el ensayo de desgaste erosivo se plasman a continuación, en la ilustración 28, 29 y 30 se muestra la pérdida de masa que se generó en los grupos de probetas sometidos al desgaste bajo los tiempos de exposición antes mencionados.

Ilustración 29 Tasa de erosión grupo Bonificado



Fuente: Autores del proyecto

El acero AISI/SAE 4140 fue recibido en estado bonificado, como se puede evidenciar en paginas anteriores, el material en éstas condiciones posee una dureza en promedio de 30 HRC y el promedio de masa por probeta es de 100,79 gramos, en la ilustración 27 se puede ver que la perdida de material es proporcional al tiempo de exposición al desgaste.

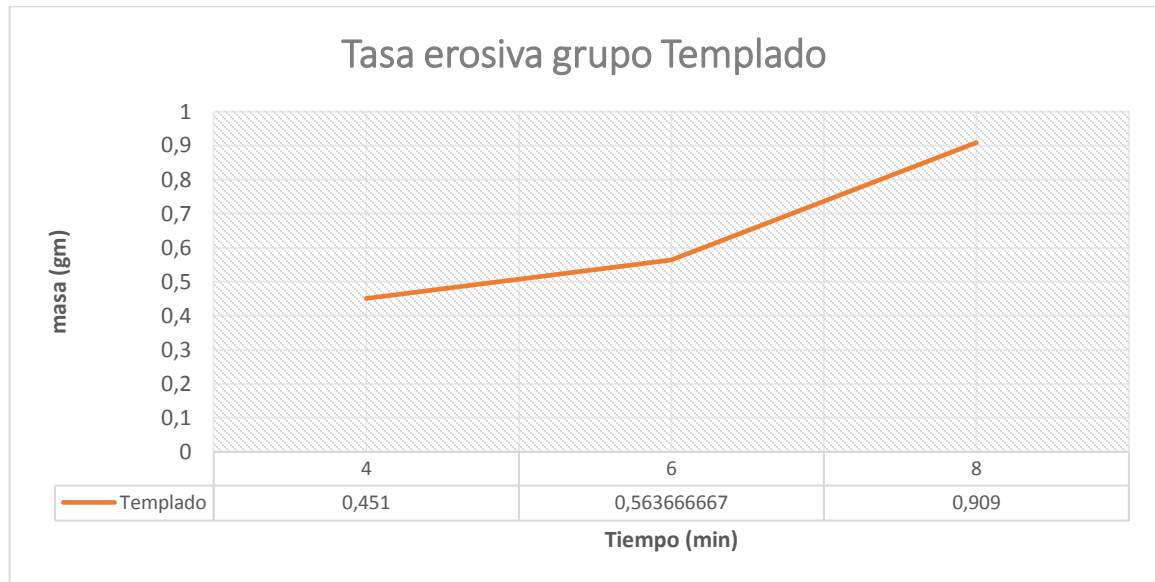
Ilustración 30 Tasa de erosión grupo Revenido



Fuente: Autores del proyecto

El material en condiciones de Revenido tuvo una dureza promedio de 28 HRC y su promedio de masa por probeta antes de ser sometido al ensayo es de 101,22 gramos, bajo estas condiciones se le realizó el desgaste erosivo por partículas solidas en los tiempos antes mencionados.

Ilustración 31 Tasa de erosión grupo Templado

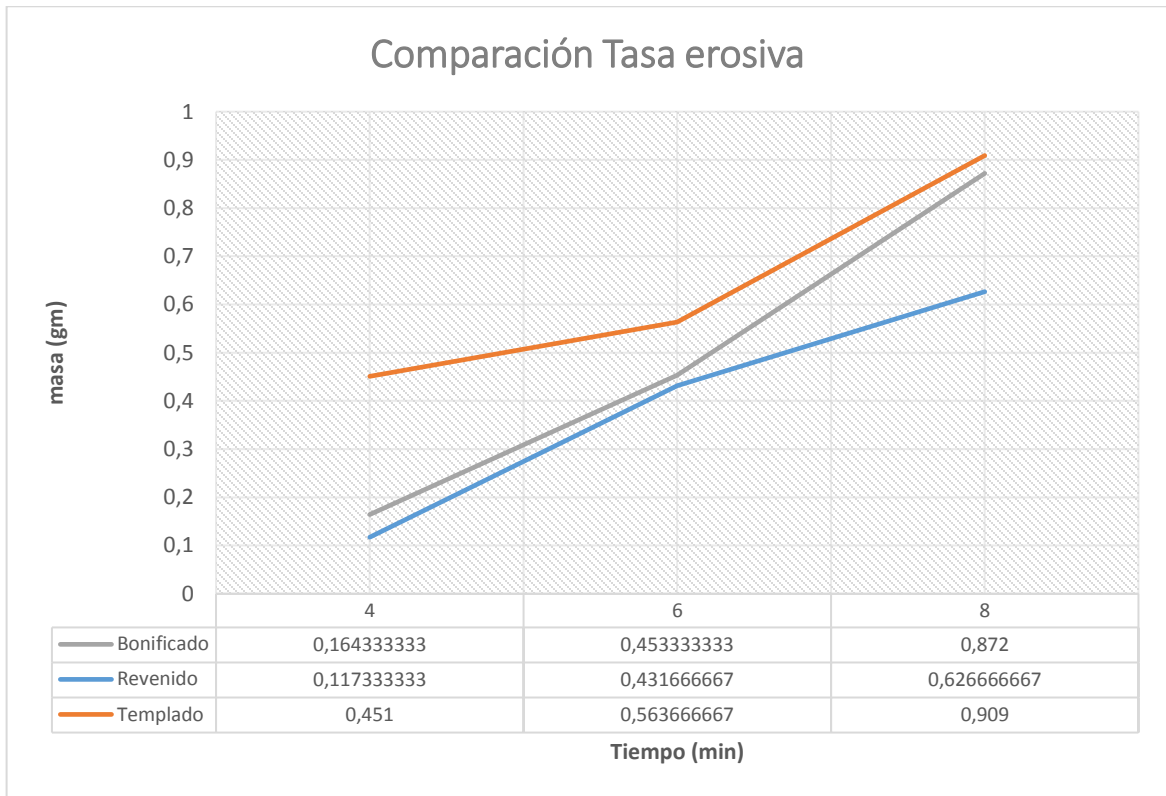


Fuente: Autores del proyecto

El temple al que se sometió el acero AIS/SAE 4140 se realizó a una temperatura muy superior a su temperatura crítica A_{c3} (796°C) con el fin de lograr una austenización completa y por consiguiente una estructura totalmente martensítica que se corrobora por la dureza promedio obtenida (44 HRC), éste tratamiento térmico genera en las probetas una pérdida de masa por el desprendimiento de carburos presentes en el material, por tal razón se puede ver que el promedio de masa por probeta del acero Templado (100,42 gramos) está por debajo de la masa promedio obtenida en los otros grupos de probetas.

En la ilustración 31 se hace un comparativo entre las tasas de pérdida de material en cada grupo de probetas sometidas al ensayo de desgaste bajo los tiempos de 4, 6 y 8 minutos.

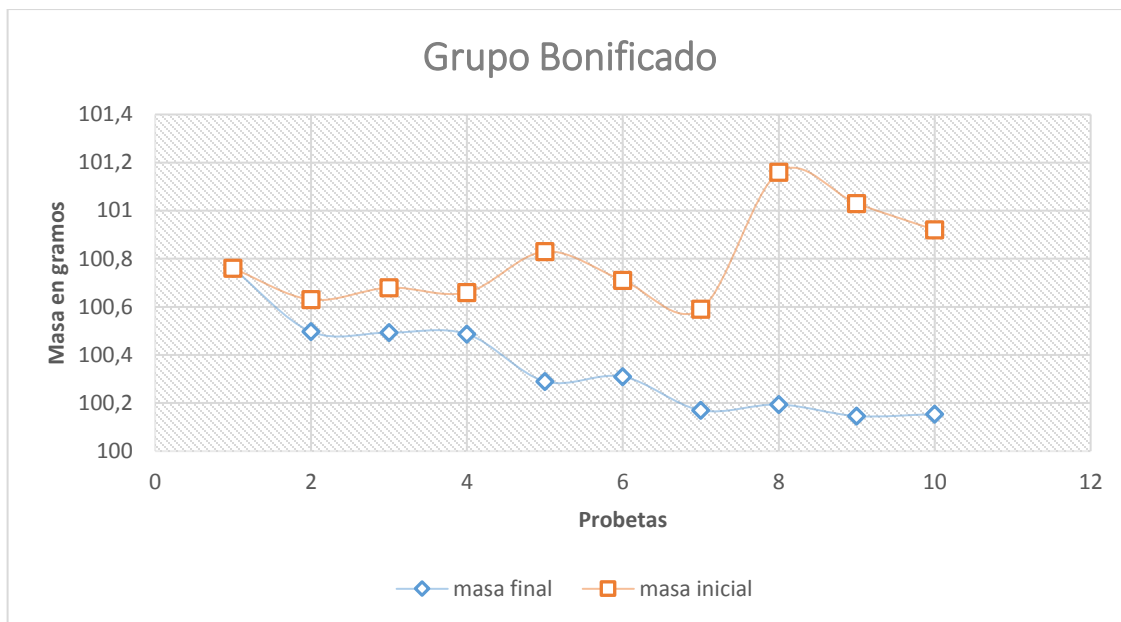
Ilustración 32 Comparación Tasa de erosión



Fuente: Autores del proyecto

En las ilustraciones 32, 33 y 34 se muestran los resultados de las diferentes tomas de masa para cada una de las probetas de los diferentes grupos, antes y después de sus respectivos ensayos de desgaste

Ilustración 33 Medición de masa antes y después del ensayo por probeta Bonificada



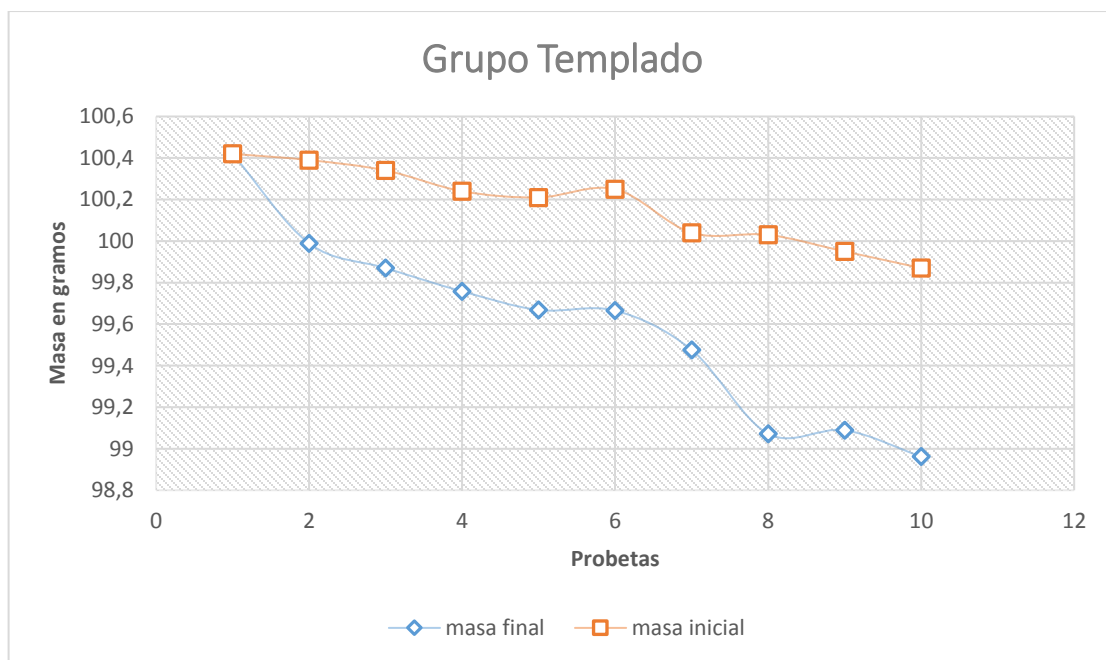
Fuente: Autores del proyecto

Ilustración 34 Medición de masa antes y después del ensayo por probeta Revenida



Fuente: Autores del proyecto

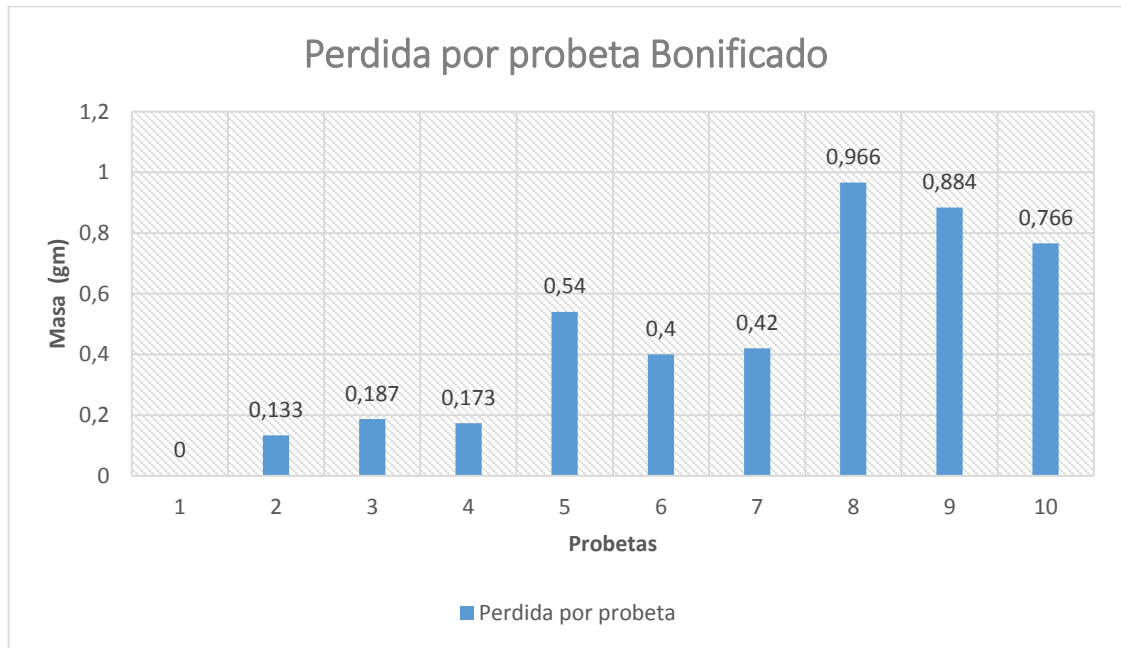
Ilustración 35 Medición de masa antes y después del ensayo por probeta Templada



Fuente: Autores del proyecto

En las anteriores ilustraciones se han mostrado los resultados de las pérdidas de material en términos de valores iniciales y finales, es decir, valores picos, pero en verdad lo que se quiere comparar es la pérdida de material generada en cada grupo de probetas por el desgaste, en las ilustraciones 35, 36, 37 y 38 se verán los valores de los diferenciales de masa, facilitando así su comparativo.

Ilustración 36 Perdida por probeta Bonificado



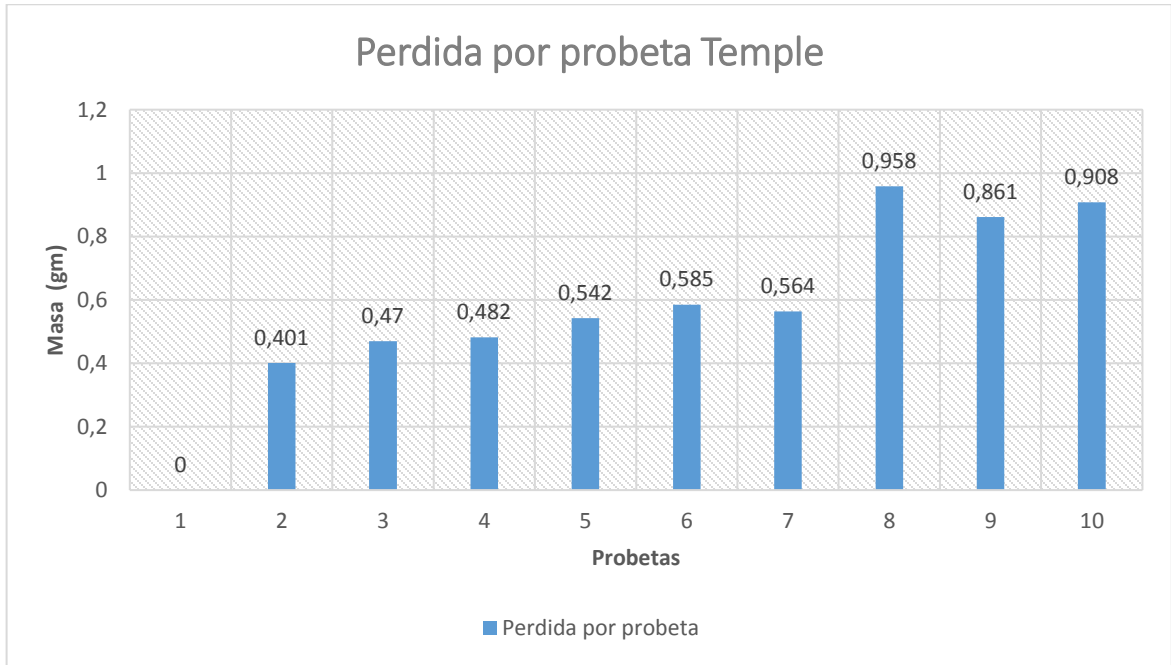
Fuente: Autores del proyecto

Ilustración 37 Perdida por probeta Revenido



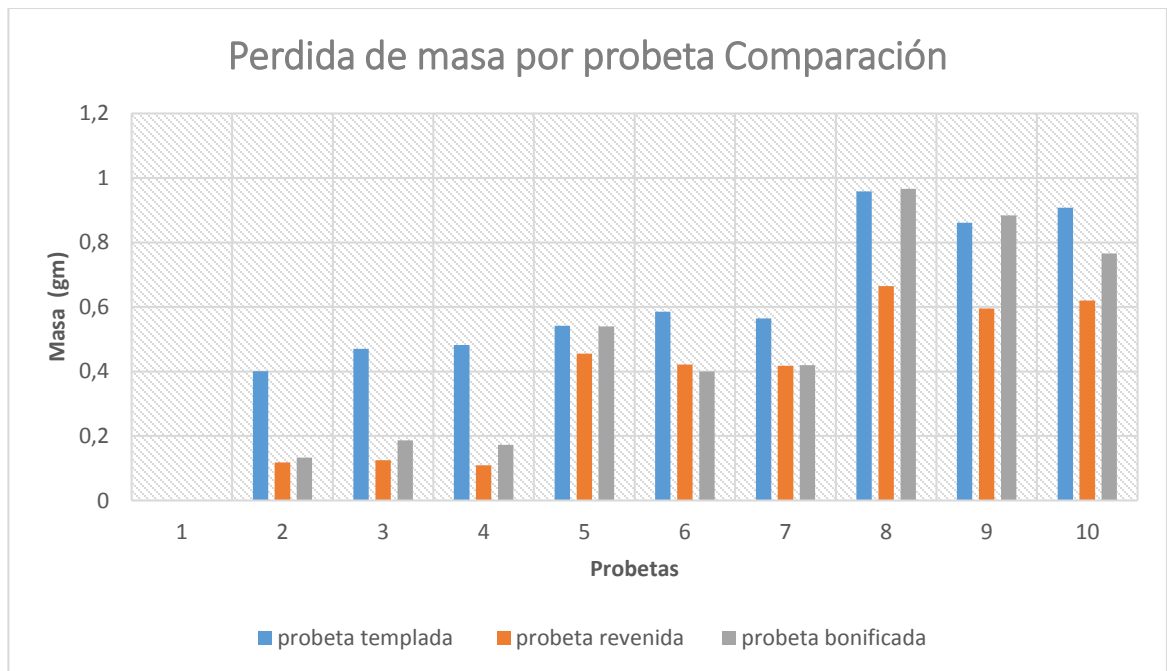
Fuente: Autores del proyecto

Ilustración 38 Perdida por probeta temple



Fuente: Autores del proyecto

Ilustración 39 Comparación pérdida de masa por probeta



Fuente: Autores del proyecto

8.2 Estereoscopía

Como una validación gráfica al ensayo de desgaste erosivo realizado en las diferentes muestras de probetas, se tomó la estereoscopía. Con ella poder evidenciar el comportamiento del acero en cada una de las huellas generadas por el tribómetro en las superficies sometidas al desgaste.


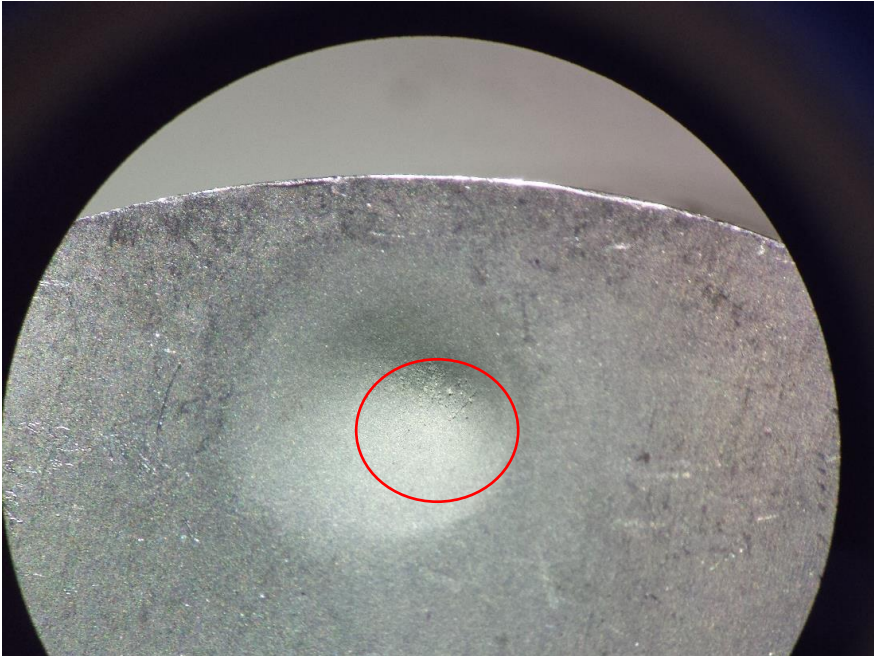
Ilustración 40 Estereoscopio



Fuente: Autores del proyecto

Las fotos a continuación mostradas se tomaron a 18x y 32x en el estereoscopio.

Tabla 33 Imágenes estereoscópica

FOTOGRAFÍAS TOMADAS DEL ESTEREOSCOPIO	
Probeta Templada Con Desgaste - 8 Minutos	
	<p>En esta imagen se puede ver la huella generada por un desgaste de ocho minutos se pueden evidenciar partículas sólidas incrustadas que permanecen como residuo en la superficie del acero después de ser sometido al ensayo.</p>
Probeta Templada Con Desgaste - 8 Minutos	
	

Probeta Templada Con Desgaste - 6 Minutos

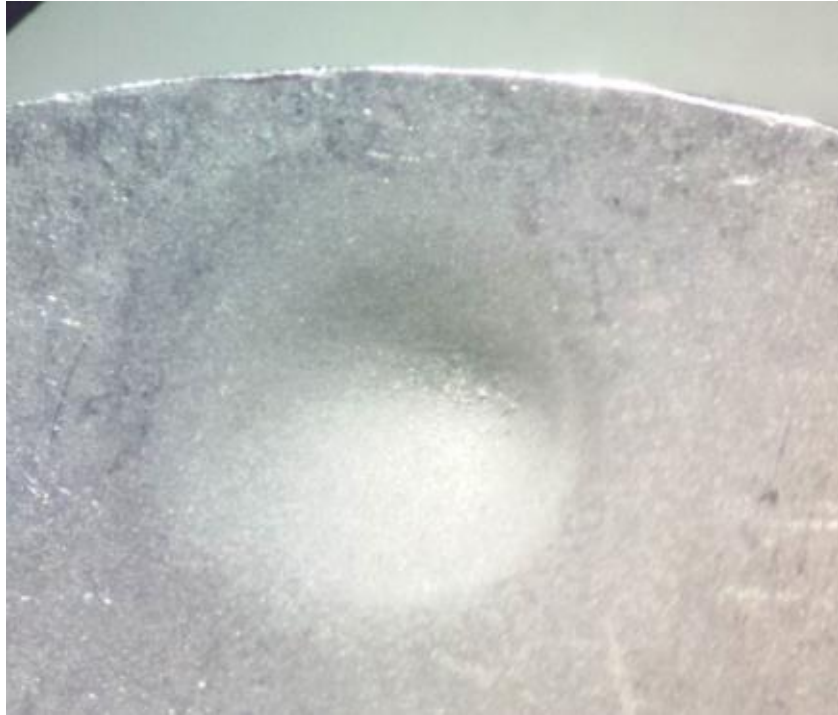


En esta imagen se puede ver una huella generada por un desgaste de seis minutos, se encuentran algunos poros ocasionados por el desprendimiento de partículas de acero de un material frágil al impacto.

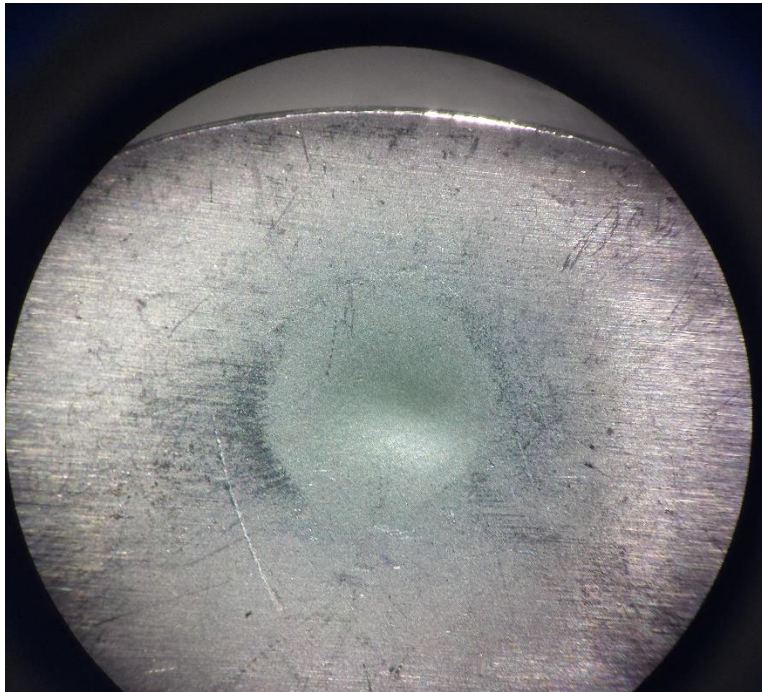
Probeta Templada Con Desgaste - 6 Minutos



Probeta Templada Con Desgaste - 4 Minutos

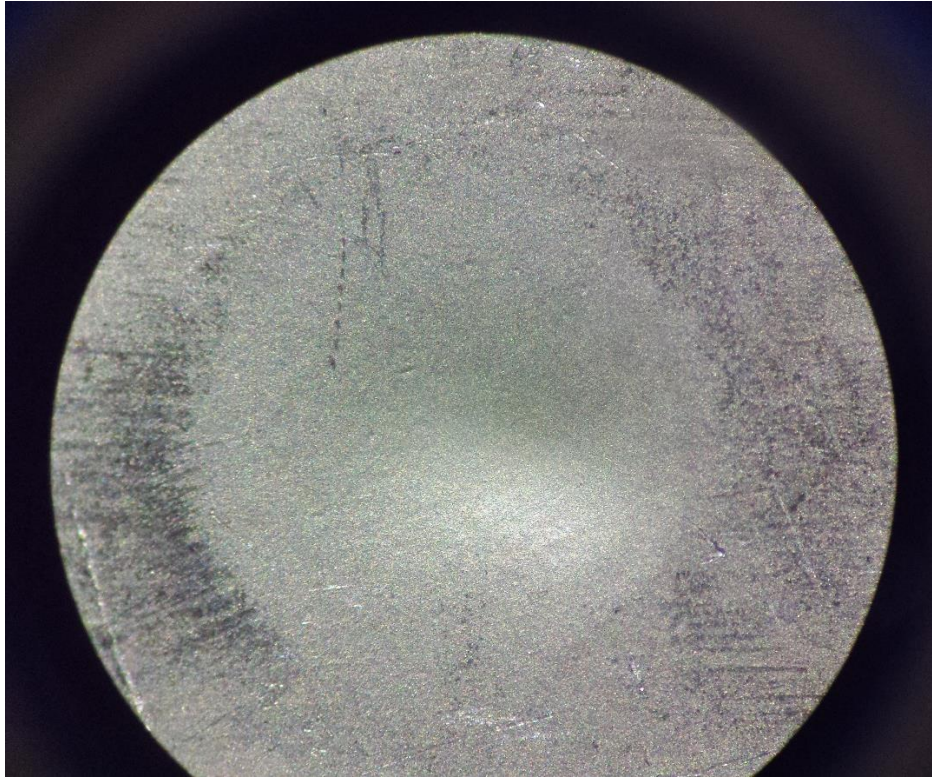


Probeta Revenida Con Desgaste - 8 Minutos

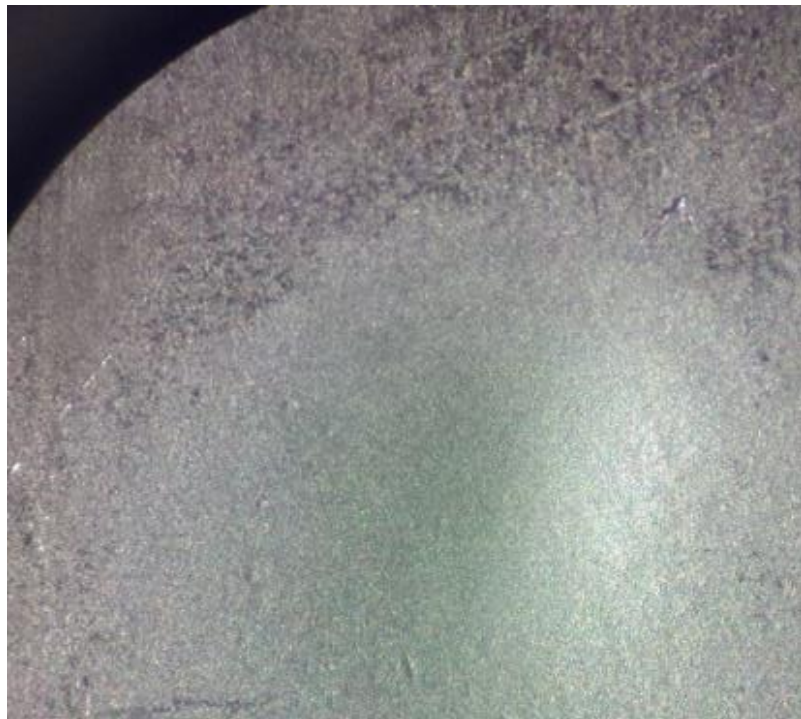


Diferente a la fotografía tomada al temple en esta huella obtenida de un desgaste a una probeta revenida se hacen notar varias diferencias, en primer lugar la huella generada es menos profunda comparada con la templada; El desgaste obtenido en esta huella no muestra señales de microfracturas, muestra un cambio dimensional por elongación en la superficie.

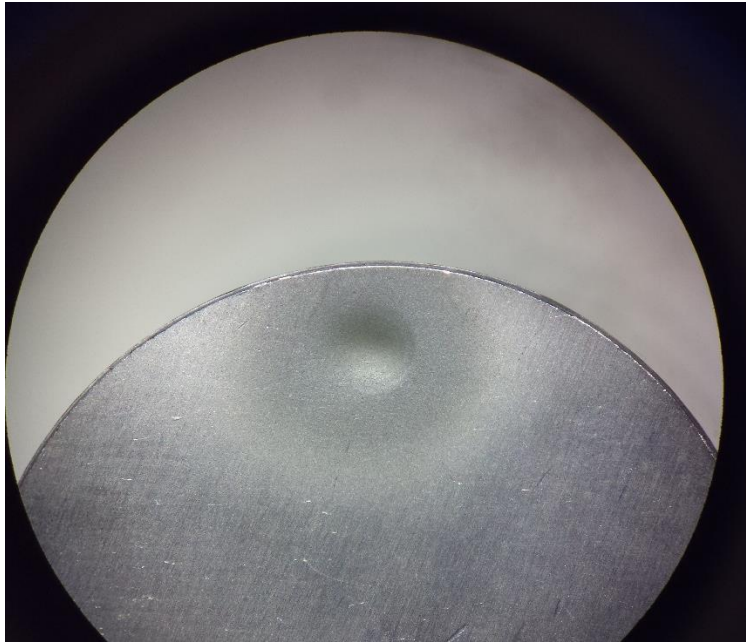
Probeta Revenida Con Desgaste - 8 Minutos



Probeta Revenida Con Desgaste - 6 Minutos

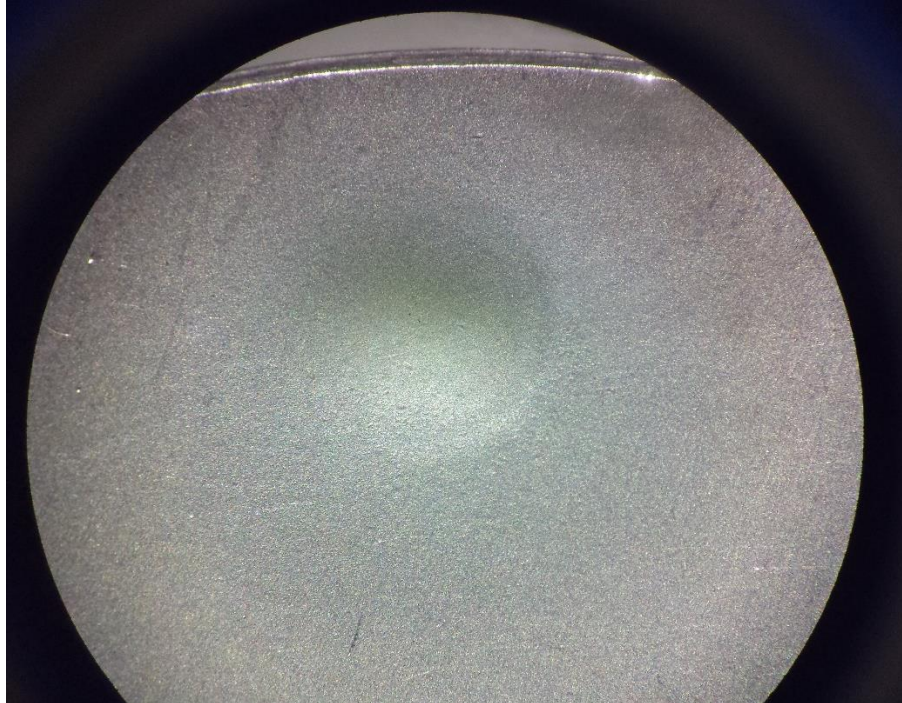


Probeta Bonificada Con Desgaste - 8 Minutos



La huella obtenida después del desgaste en el material bonificado es mas profunda que la obtenida en el revenido, sin embargo no supera la encontrada en el temple. Tampoco se pueden evidenciar poros de gran tamaño debido a la accion del impacto de particulas solidas y posterior desprendimiento de material.

Probeta Bonificada Con Desgaste - 8 Minutos



Probeta Bonificada Con Desgaste - 6 Minutos



Probeta Bonificada Con Desgaste - 6 Minutos



Fuente: Autores del proyecto

8.3 Conclusiones

- Después de analizar las diferentes huellas y la pérdida de masa, en los diferentes grupos de tratamientos térmicos durante el ensayo, se puede evidenciar que en las probetas templadas hay mayor remoción de material debido a que por tener una superficie más dura es menos resistente al impacto.
- Con el tratamiento de revenido se logra disminuir la dureza del material logrando una buena tenacidad, que brinda al material AISI SAE 4140 una mayor resistencia al desgaste por partículas sólidas, debido a su capacidad de absorber energía en el impacto.
- De acuerdo a los resultados en el análisis de masa obtenido en los diferentes tiempos de exposición, se puede ver que a partir de los 8 minutos de someter las probetas al desgaste empieza a aumentar de manera más significativa la pérdida de material.
- El tamizado es uno de los procesos más críticos a la hora de realizar el ensayo de erosión ya que el tamaño de partícula es uno de los factores que relevantes en el funcionamiento del equipo, puesto que éste fue fabricado bajo recomendaciones de la norma ASTM G76 y cada pieza está diseñada para un tamaño de partícula cercano a 50 micras.

9 REFERENCIAS

- [1] AKBARZADEH, Hadi y GOLOZAR, Asieh. (2009). Effects of Austenizing Time on Wear Behavior of D6 Tool Steel. *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH. INTERNATIONAL*, 29-32. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/sci-hub.club/science/article/pii/S1006706X10600234>
- [2] Alvaro M. TREVIÑO A. (2001). *DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA PRUEBAS DE EROSIÓN*. Mexico : Facultad de ingeniería mecánica .
- [3] ANDRADE, M.F., et al. . (2009). Influence of the abrasive particles size in the micro-abrasion. *Wear* 267, 12–18. Obtenido de <http://sibulgem.unilibre.edu.co:2053/science/article/pii/S004316480900235X>
- [4] ANDREA VILLAGRÁN T., PAUL R. HARRIS D. (2009). ALGUNAS CLAVES PARA ESCRIBIR CORRECTAMENTE UN ARTICULO CIENTÍFICO . *CHIL PEDIATR*, 70-78.
- [5] Antonio A. GORNI. (2012). *STEEL FORMING AND HEAT TREATING HANDBOOK* . Brazil.
- [6] ASKELAN, Donald R. (1998). *CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES*. International Thomson Editores, S.A.
- [7] ASTM. (2000). ASTM G76.
- [8] BELZUNCE VARELA, Francisco. (2001). *ACEROS Y FUNDICIONES: ESTRUCTURAS, TRANSFORMACIONES, TRATAMIENTOS TERMICOS y APLICACIONES*. Universidad de Oviedo. Obtenido de <http://www.aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>
- [9] BUDINSKI, Kenneth G. (2010). Adhesive transfer to abrasive particles in abrasion testing. *Wear*, 1258– 1263. Obtenido de <http://sibulgem.unilibre.edu.co:2053/science/article/pii/S0043164811001657>
- [10] CÉSAR D. REY MERLO, GERMAN J. VILLAR HERNÁNDEZ. (2009). *uis.edu.co*. Obtenido de repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/5829/2/129550.pdf
- [11] DA SILVA, A. D., et al. (2014). Distortion in quenching an AISI 4140 C-ring – Predictions and experiments. *Materials and Design* 42, 55–61. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224114005430>
- [12] DE LA CONCEPCIÓN, Valeria L.; LORUSSO, Hernán N. and SVOBODA, Hernán. (2015). Effect of carbon content on microstructure and mechanical. *Procedia Materials Science* 8, 1047 – 1056. Obtenido de http://ac.els-cdn.com/S2211812814001011/1-s2.0-S2211812814001011-main.pdf?_tid=52136498-46b1-11e5-9dc7-00000aacb362&acdnat=1440016490_0dbbae9d563a9bb49a5ea2d2c8a2b5f6
- [13] DONALD ASKELLAND . (1998). *CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES* . MISSOURI: INTERNATIONAL THOMPSON EDITORES .

- [14]Federación de enseñanza de Andalucía . (2012). El malestar docente . *Temas para la educación*.
- [15]Fundación para la prevención de riesgos laborales. (s.f.). *Manual de procedimientos para la evaluación de riesgos y condiciones de trabajo desde el punto de vista ergonómico en los trabajos de soldadura*. Aragón: Cepyme.
- [16]GAONA, Alejandro.; GARCÍA, Jorge A. and FRANCISCO, Cauhtemoc. . (2012). Analisis del desgaste erosivo causado en aceros inoxidables AISI/SAE 304, 316 y 410 . Tuxpan, Mexico: Universidad Veracruzana.
- [17]GOMEZ, Ronald M. (2009). Estudio del comportamiento a desgaste erosivo de recubrimientos WC-CO micro y nano estructurado. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- [18]GRUPO DE HIDRAULICA RURAL Y URBANA IMTA. (Diciembre, 2001). TUBOS VENTURI, DALL Y TOBERA . *Instituto mexicano de tecnología del agua* .
- [19]GUZMAN ORNELAS, Fernando. (2013). *ANÁLISIS DE ACEROS POR MICROSCOPIA ÓPTICA*. Mexico D.F. Obtenido de <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/12065/ANALISISACERO.pdf?sequence=1>
- [20]HIGUERA, Oscar F.; MORENO Carlos M. and GUTIERREZ Manuela. (2010). Evaluación de la resistencia al desgaste adhesivo del acero austenítico al manganeso sometido a ciclos térmicos. *Ingeniería y Desarrollo Número 27*, 151-168.
- [21]IDAYAN, A; GNANAVELBABU, A and RAJKUMAR, K. (2014). Influence of Deep Cryogenic Treatment on the Mechanical. *Procedia Engineering*, 1683 – 1691. Obtenido de <http://sibulgem.unilibre.edu.co:2053/science/article/pii/S1877705814033876>
- [22]INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). (2008). *NTC 1486*.
- [23]INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). (2008). *NTC 5613*.
- [24]J. GONZÁLEZ M., A. ALONSO A. (2014). conocimientos básicos para leer un artículo científico. *Acta Pediátrica* , 244-251.
- [25]JESUS M. ROJAS R. (2009). *El soldador y los humos de soldadura*. España: OSALAN, Instituto Vasco de salud y prevención de riesgos laborales.
- [26]José D. MORALES C., Mirlene BARRIENTOS J. (2014). ¿Cómo hacer el título de un artículo un anzuelo para lectores? *Investigación en educación médica*, 169-171.
- [27]Juan F. CALDERA M.; María D.R. CARRANZA A.;Ignacio PÉREZ P. (2015). Actitudes de los estudiantes universitarios ante la tutoría Diseño de una escala de medición. *REVISTA DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR* .

- [28] JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN. (2009). *Guía para la prevención de riesgos en los trabajos de soldadura*. ESPAÑA: Angelma S.A.
- [29] LIRA CALMET, Gissela. (2009). *APLICACIÓN DE LA CRIOGENIA EN EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE ACEROS PARA TRABAJO EN FRÍO: K100 (AISI D3)*. Lima: TESIS PUCP. Obtenido de <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>
- [30] MACCHINI, R.; BRADLEY, M.S. and DENG, T. . (2013). Influence of particle size, density, particle concentration on bend. *Wear* 303, 21–29. Obtenido de <http://sibulgem.unilibre.edu.co:2053/science/article/pii/S0043164813001695>
- [31] MARIA A. DÁVILA ACEDO, FLORENTINA CAÑADA C., JESÚS SANCHEZ M., VICENTE MELLADO J. (2016). Las emociones en el aprendizaje de física y química. *EDUCACIÓN QUÍMICA*, 217-225.
- [32] MESA, Dairo H.; SINATORA, Admilton, and TORO, Alejandro. (2003). Resistencia al desgaste erosivo-corrosivo de aceros inoxidables martensíticos con alto contenido de nitrógeno. *SCIENTIA ET TECHNICA* N° 21, 53-58.
- [33] Molera Solá Pere. (1991). *Tratamientos Térmicos de los Metales*. Barcelona: Marcombo, S.A.
- [34] MOLERA SOLÁ, Pere. (1991). *Tratamientos térmicos de los metales*. Barcelona: Marcombo, S.A.
- [35] MORALES, Joan y SIDOROVAS, Luís F. . (2014). Influencia de un tratamiento criogénico en las propiedades mecánicas de. *Revista Ingeniería UC, Vol. 21, No. 3*, 24-32. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70732643004>
- [36] MOVAHED, P., et al. (2009). The effect of intercritical heat treatment temperature on the tensile properties. *Materials Science and Engineering A* 518, 1–6. Obtenido de <http://sibulgem.unilibre.edu.co:2053/science/article/pii/S0921509309006248>
- [37] Mustafa Ulutan, Osman N. Celik, Hakan Gasan. (s.f.). *ScienceDirect*. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com/sci-hub.club/science/article/pii/S1005030210600424>
- [38] NICOLAS LLANOS MARULANDA . (2011). CLASES Y TIPOS DE INVESTIGACIÓN CON CARACTERÍSTICAS . BOGOTÁ, COLOMBIA : FACULTAD DE INGENIERÍA DE PETROLEOS- UNIVERSIDAD AMERICA .
- [39] OBANDO, Johnny F. (2011). Subcero y criogénico: el frío, secreto de los fórmula Uno. *Innovación & Desarrollo. Tratamientos Ferrotérmicos SAS*, 1-10.
- [40] PRECIADO, M., et al. (2008). TRATAMIENTOS CRIOGÉNICOS SOBRE EL ACERO F1560 CEMENTADO PARA LA MEJORA DE PROPIEDADES A FATIGA. *Anales de Mecánica de la Fractura* 25, Vol. 1, 421-424. Obtenido de <http://www.gef.es/Congresos/25/pdf/6-17.pdf>

- [41]RAMIREZ SALGADO, J., et al. (2013). Detection of secondary phases in duplex stainless. *MATERIALS CHARACTERIZATION* 86, 250–262. Obtenido de <http://sibulgem.unilibre.edu.co:2053/science/article/pii/S1044580313003264>
- [42]REY MERLO, César Damián. (2009). *Diseño y construcción de una maquina Pin-On-Disk para realizar ensayos de desgaste*. Santander.
- [43]RODRIGUEZ, E.; FLÓRES, M. and MERCADO, R. . (2009). Erosive wear by silica sand on AISI H13 and 4140 steels. *Wear*, 2109–2115. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com.sci-hub.club/science/article/pii/S0043164809004864>
- [44]Santiago ROJANO R.; Gema LOPEZ G. (2016). Desarrollo de tecnologías de la información y la comunicación para reforzar los procesos de enseñanza y aprendizaje en ciencias en el grado de maestro/a en educación infantil en la Universidad de Málaga. *Educación química*, 226-232 .
- [45]SHARMA, Ankit; KUMAR, Abhishek and TYAGI, Rajnesh. (2014). Erosive wear analysis of medium carbon dual. *Wear*, 1-16. Obtenido de <http://sibulgem.unilibre.edu.co:2053/science/article/pii/S0043164814003743>
- [46]Smith William F. (2006). *fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, 4th Edition*. Mc Graw Hill.
- [47]SMITH, William F. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales, 4th Edition*. Mc Graw Hill.
- [48]SOTO ROMERO, Efraín. (2007). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRIBOMETRO ARENA SECA/DISCO VULCANIZADO. Veracruz, Mexico: FIME, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- [49]SUMITEC S.A. (s.f.). *Ficha técnica: acero grado maquinaria AISI 4140*. La Lima Cartago. Obtenido de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%204140.pdf>
- [50]SWEDISH STANDARDS INSTITUTE. (s.f.). Obtenido de <http://www.sis.se/en/external-categories/metals-test-methods-and-analytical-procedures-astm-vol-03/corrosion-of-metals-wear-and-erosion-astm-vol-0302/astm-g403>
- [51]ULUTAN, Mustafa; CELIK, Osman N. and GASAN, Hakan. (2010). Effect of Different Surface Treatment Methods on the Friction. *J. Mater. Sci. Technol*, 251-257. Obtenido de <http://www.sciencedirect.com.sci-hub.club/science/article/pii/S1005030210600424>
- [52]Va Larre Ricardo Oscar. (2010). *Faculltad regiona Rosario*. Obtenido de http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/5-_Estructuras_del_acero_v2.pdf
- [53]Va Larre ricardo oscar. (2010). *Facultad regional Rosario*. Obtenido de http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/5-_Estructuras_del_acero_v2.pdf

- [54]VALDÉS, J; CORONADO, J. and GARCÍA, J. (2006). COMPARACIÓN Y ESTUDIO DE LA FRACTURA DEL CIGÜEÑAL DE UN MOTOR DE CUATRO CILINDROS EN LINEA. *Scientia et Technica Año XII, No 31*, 139-144.
- [55]WILLIAM D. CALLISTER. (s.f.). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. utah : Editorial REVERTE S.A.
- [56]William D. Callister. (s.f.). *Introducción a la ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona: Reverté, S.A.
- [57]ZHAO, X., et al . (2007). Effect of Intercritical Quenching on Reversed Austenite Formation and Cryogenic Toughness in QLT-Processed 9%Ni Steel". *Journal of Iron and Steel Research, International*, 240–244. Obtenido de www.scholarmate.com:
http://www.scholarmate.com/indexhtml/detail/p8llwasoUBs%3D,16,zh_cn.html
- [58]ZHIRAFAR, S; REZAEIAN, A and PUGHA, M. . (2007). Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology* 186, 298–303. Obtenido de spectrum.library.concordia.ca:
<http://spectrum.library.concordia.ca/8600/>

ANEXOS

- 1. NORMA ASTM G76**
- 2. COTIZACION ELECTROEROSIÓNADO**
- 3. ESPECTROMETRÍA ACERO AISI/SAE 4140**
- 4. PLANOS DISEÑO DEL TRIBÓMETRO**
- 5. FOTOGRAFÍAS CONFORMADO DEL PORTA-PROBETAS**
- 6. FOTOGRAFÍAS PROCESO DE ELECTROEROSIÓN**
- 7. FOTOGRAFÍAS FABRICACIÓN DE LA ESTRUCTURA**
- 8. MANUAL DE USO Y MANTENIMIENTO DEL TRIBÓMETRO**



Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets¹

This standard is issued under the fixed designation G 76; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of material loss by gas-entrained solid particle impingement erosion with jetnozzle type erosion equipment. This test method may be used in the laboratory to measure the solid particle erosion of different materials and has been used as a screening test for ranking solid particle erosion rates of materials in simulated service environments (1, 2).² Actual erosion service involves particle sizes, velocities, attack angles, environments, and so forth, that will vary over a wide range (3-5). Hence, any single laboratory test may not be sufficient to evaluate expected service performance. This test method describes one well characterized procedure for solid particle impingement erosion measurement for which interlaboratory test results are available.

1.2 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:³

E 122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With a Specified Tolerable Error, the Average for a Characteristic of a Lot or Process

G 40 Terminology Relating to Wear and Erosion

2.2 American National Standard:

ANSI B74.10 Grading of Abrasive Microgrits⁴

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G02 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.10 on Erosion by Solids and Liquids.

Current edition approved Jan. 1, 2004. Published January 2004. Originally approved in 1983. Last previous edition approved in 2002 as G 76 – 02.

² Boldface numbers in parentheses refer to references at the end of this test method.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

⁴ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036.

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *erosion*—progressive loss of original material from a solid surface due to mechanical interaction between that surface and a fluid, a multicomponent fluid, or impinging liquid or solid particles.

3.1.2 *impingement*—a process resulting in a continuing succession of impacts between (liquid or solid) particles and a solid surface.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 *erosion value*—the volume loss of specimen material divided by the total mass of abrasive particles that impacted the specimen ($\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).

3.2.2 *Normalized Erosion Rate*—erosion value ($\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) of specimen material divided by erosion value ($\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) of reference material.

4. Summary of Practice

4.1 This test method utilizes a repeated impact erosion approach involving a small nozzle delivering a stream of gas containing abrasive particles which impacts the surface of a test specimen. A standard set of test conditions is described. However, deviations from some of the standard conditions are permitted if described thoroughly. This allows for laboratory scale erosion measurements under a range of conditions. Test methods are described for preparing the specimens, conducting the erosion exposure, and reporting the results.

5. Significance and Use

5.1 The significance of this test method in any overall measurements program to assess the erosion behavior of materials will depend on many factors concerning the conditions of service applications. The users of this test method should determine the degree of correlation of the results obtained with those from field performance or results using other test systems and methods. This test method may be used to rank the erosion resistance of materials under the specified conditions of testing.

6. Apparatus

6.1 The apparatus is capable of eroding material from a test specimen under well controlled exposure conditions. A schematic drawing of the exit nozzle and the particle-gas supply system is shown in Fig. 1. Deviations from this design are

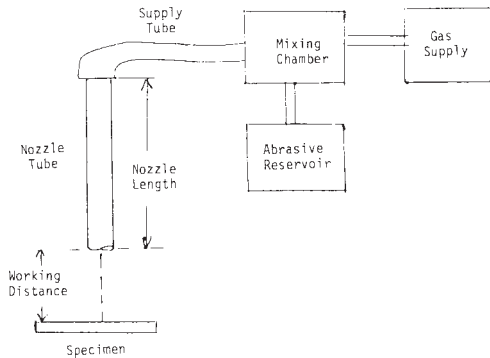


FIG. 1 Schematic Drawing of Solid Particle Erosion Equipment

TABLE 1 Characteristics of Type 1020 Steel Reference Material

Annealed 15 min at 760°C (1400°F), air cooled.

Hardness: HRB = 70 ± 2.

Chemical Composition:
C = 0.20 ± 0.01 wt %
Mn = 0.45 ± 0.10
S = 0.03 ± 0.01
Si = 0.1 ± 0.05
P = 0.01 ± 0.01

permitted; however, adequate system characterization and control of critical parameters are required. Deviations in nozzle design and dimensions must be documented. Nozzle length to diameter ratio should be 25:1 or greater in order to achieve an acceptable particle velocity distribution in the stream. The recommended nozzle⁵ consists of a tube about 1.5 mm inner diameter, 50 mm long, manufactured from an erosion resistant material such as WC, Al₂O₃, and so forth. Erosion of the nozzle during service shall be monitored and shall not exceed 10 % increase in the initial diameter.

6.2 Necessary features of the apparatus shall include a means of controlling and adjusting the particle impact velocity, particle flux, and the specimen location and orientation relative to the impinging stream.

6.3 Various means can be provided for introducing particles into the gas stream, including a vibrator-controlled hopper or a screw-feed system. It is required that the system provide a uniform particle feed and that it be adjustable to accommodate desired particle flow values.

6.4 A method to measure the particle velocity shall be available for use with the erosion equipment. Examples of accepted methods are high-speed photography (6), rotating double-disk (7), and laser velocimeter (8). Particle velocity

shall be measured at the location to be occupied by the specimen and under the conditions of the test.

7. Test Materials and Sampling

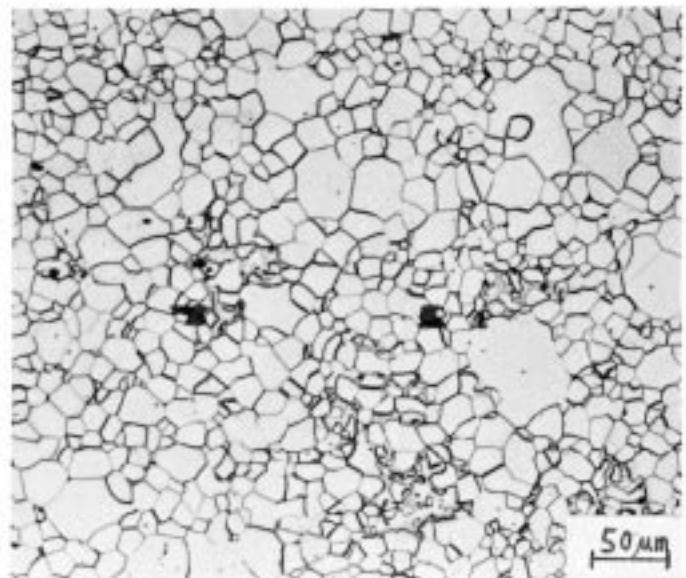
7.1 This test method can be used over a range of specimen sizes and configurations. One convenient specimen configuration is a rectangular strip approximately 10 by 30 by 2 mm thick. Larger specimens and other shapes can be used where necessary, but must be documented.

7.2 The abrasive material to be used shall be uniform in essential characteristics such as particle size, moisture, chemical composition, and so forth.

7.3 Sampling of material for the purpose of obtaining representative test specimens shall be done in accordance with acceptable statistical practice. Practice E 122 shall be consulted.

8. Calibration of Apparatus

8.1 Specimens fabricated from Type 1020 steel (see Table 1 and Fig. 2) equivalent to that used in the interlaboratory test



**FIG. 2 Microstructure of 1020 Steel Reference Material
ASTM Grain Size 9**

series⁶ shall be tested periodically using specified (see Section 9) 50 µm Al₂O₃ particles to verify the satisfactory performance of the apparatus. It is recommended that performance be verified using this reference material every 50 tests during a measurement series, and also at the beginning of each new test series whenever the apparatus has been idle for some time. The recommended composition, heat treatment, and hardness range for this steel are listed in Table 1. The use of a steel of different composition may lead to different erosion results. A photomicrograph of the specified Al₂O₃ particles is shown in Fig. 3.

⁵ A source for the recommended nozzle (tungsten carbide) is Kennametal, Inc., Latrobe, PA.

⁶ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR: G02-1003.

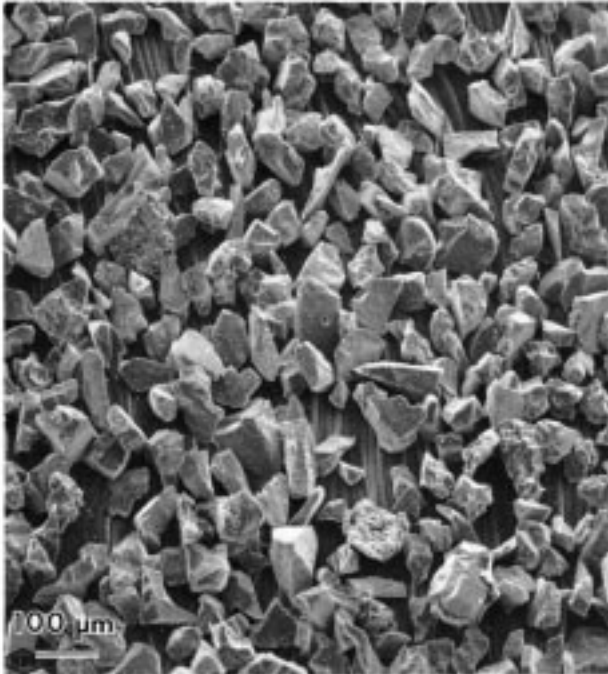


FIG. 3 Photomicrograph of 50 μm Al₂O₃ Particles Used in Interlaboratory Testing

The range of erosion results to be expected for this steel under the standard test conditions specified in Section 9 is shown in Table 2 and is based on interlaboratory test results.⁶

8.2 Calibration at standard test conditions is recommended even if the apparatus is operated at other test conditions.

8.3 In any test program the particle velocity and particle feed rate shall be measured at frequent intervals, typically every ten tests, to ensure constancy of conditions.

9. Standard Test Conditions

9.1 This test method defines the following standard conditions.

9.1.1 The nozzle tube shall be 1.5 mm ± 0.075 mm inner diameter at least 50 mm long.

9.1.2 The test gas shall be dry air, -50°C dew point or lower.

9.1.3 The abrasive particles shall be nominal 50-μm angular Al₂O₃,⁷ equivalent to those used in the interlaboratory test series (see Fig. 3). Abrasive shall be used only once.

9.1.4 The abrasive particle velocity shall be 30 ± 2 m·s⁻¹, measured at the specimen location. At this velocity the gas flow

⁷ Aluminum oxide particles obtained from Norton Co., Worcester, MA as grade 240-grit alundum powder. Typical size distribution (determined by sedimentation): 100 % between 20 to 83 μm, 50 % between 42 to 57 μm, 50 % coarser than 48 μm.

TABLE 2 Interlaboratory Test Results (Provisional)

Test Conditions	Laboratory Number	Number of Replicates	Average (.001 mm ³ /g)	Standard Deviation (.001 mm ³ /g)	Deviation from Average (.001 mm ³ /g)
Condition A: 1020 steel, 50 μm Al ₂ O ₃ , 30 m/s, 90° 2 g/min	1	9	2.240	0.420	-0.494
	2	9	3.130	0.130	0.396
	3	10	2.130	0.068	-0.604
	4	10	3.720	0.680	0.986
	5	10	2.450	0.660	-0.284
	5	9.600	2.734	0.468	0.807
	Number	Average	Average	Within-Laboratory Standard Deviation	Between-Laboratory Standard Deviation (Provisional)
			Coefficient of Variation (%) =	17.1	29.5
			95 % Limits =	1.31	2.26
				Within-Laboratory	Between-Laboratory
Condition B: 1020 steel, 50 μm Al ₂ O ₃ , 70 m/s, 90° 2 g/min	1	8	31.500	1.100	3.340
	2	8	23.200	0.040	-4.960
	3	8	22.900	0.900	-5.260
	4	4	32.400	0.650	4.240
	5	8	30.800	1.500	2.640
	5	7.200	28.160	0.969	4.786
	Number	Average	Average	Within-Laboratory Standard Deviation	Between-Laboratory Standard Deviation (Provisional)
			Coefficient of Variation (%) =	3.4	17.0
			95 % Limits =	2.71	13.40
				Within-Laboratory	Between-Laboratory
Condition C: 304 stainless steel, 50 μm Al ₂ O ₃ , 70 m/s, 90° 2 g/min	1	8	40.000	1.300	7.640
	2	8	25.400	0.120	-6.960
	3	8	26.300	0.780	-6.060
	4	4	38.000	1.200	5.640
	5	8	32.100	3.000	-0.260
	5	7.200	32.360	1.597	6.786
	Number	Average	Average	Within-Laboratory Standard Deviation	Between-Laboratory Standard Deviation (Provisional)
			Coefficient of Variation (%) =	4.9	21.0
			95 % Limits =	4.47	19.00
				Within-Laboratory	Between-Laboratory

rate will be approximately $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ and the system pressure will be approximately 140 kPa (20 psig) although the pressure will depend on the specific system design.

9.1.5 The test time shall be 10 min to achieve steady state conditions. Longer times are permissible so long as the final erosion crater is no deeper than 1 mm.

9.1.6 The angle between the nozzle axis and the specimen surface shall be $90 \pm 2^\circ$.

9.1.7 The test temperature shall be the normal ambient value (typically between 18°C to 28°C).

9.1.8 The particle feed rate shall be $2.0 \pm 0.5 \text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$. This corresponds to a particle flux at the specimen surface of about $2 \text{ mg}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ under standard conditions. Particle flux determination requires measurement of the eroded area on the specimen and is subject to considerable error. A measured width and depth profile of an erosion crater produced using stated conditions is shown in Fig. 4 and indicates a typical

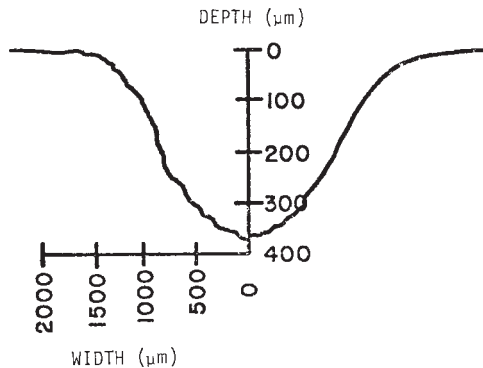


FIG. 4 Example of Erosion Crater Profile for 1020 Steel Eroded at 70 m/s Particle Velocity Using Standard Conditions Otherwise

eroded width/depth relation.

9.1.9 The distance from specimen surface to nozzle end shall be $10 \pm 1 \text{ mm}$.

10. Optional Test Conditions

10.1 When test conditions or materials other than those given in Section 9 are used, reference to this test method shall clearly specify all test conditions and materials. It should be noted that other conditions, for example, larger particle velocities, may adversely affect measurement precision.

11. Test Procedure

11.1 Establish and measure the particle velocity and particle flow specified. Adjust equipment controls to obtain proper velocity and flow conditions before inserting test specimens. Particle flow rate values are determined by collecting⁸ and subsequently weighing the abrasive exiting from the nozzle for a measured time period.

11.2 Prepare the specimen surface if required to achieve uniformity and adequate finish. Grinding through a series of abrasive papers to 400 grit is usually adequate so long as all

surface scale is removed. A surface roughness of $1 \mu\text{m}$ (40 $\mu\text{in.}$) rms or smaller is recommended. Clean the specimen surface carefully.⁹ Weigh on an analytical balance to $\pm 0.01 \text{ mg}$.¹⁰

11.3 Mount the specimen in proper location and orientation in the apparatus. Subject the specimen to particle impingement for a selected time interval, measured to an accuracy of 5 s. Remove the specimen, clean carefully,⁹ reweigh and calculate the mass loss.

11.4 Repeat this process to determine at least four points for a total time of at least 10 min and plot those values as mass loss versus elapsed time. Suitable times would be 2, 4, 8, and 16 min for a material such as Type 1020 steel. Steady state erosion should result after 1 to 2 min, depending on the material. Two examples of measured erosion versus time curves are shown in Fig. 5.

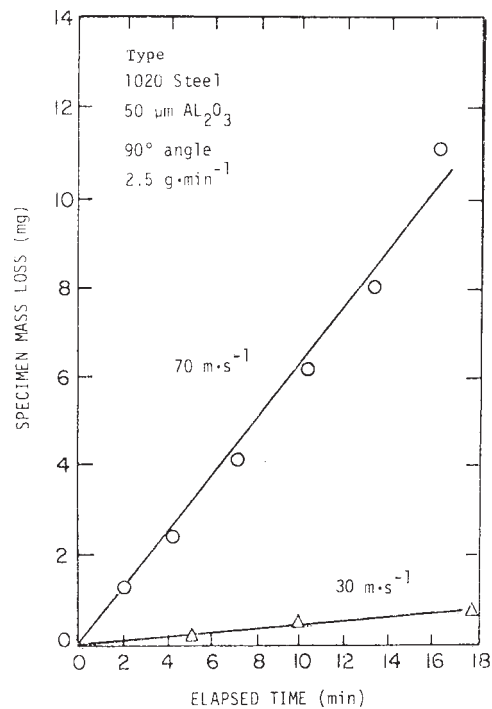


FIG. 5 Two Examples of Erosion versus Time for Type 1020 Steel at $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

11.5 The steady state erosion rate (see Terminology G 40) is determined from the slope of the mass loss versus time plot. The average erosion value is calculated by dividing erosion rate ($\text{mg}\cdot\text{min}^{-1}$) by the abrasive flow rate ($\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$) and then dividing by the specimen density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$). Report the average erosion value as ($\text{mm}^3\cdot\text{g}^{-1}$).

11.6 Repeat 11.1 at the end of a series of tests (typically every 10 tests) and more frequently if necessary.

⁹ Important considerations in cleaning include surface oils or greases, surface rust or corrosion, adhering abrasive particles, etc.

¹⁰ Erosion weight loss determinations to $\pm 0.1 \text{ mg}$ may be sufficient for particle velocities above $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ or sufficiently long exposure times which lead to weight losses greater than 10 mg.

⁸ Particles may be collected by directing the flow from the nozzle into a large vented container. Care must be taken to avoid causing any significant back pressure on the nozzle as this will disturb the system flow conditions.

12. Report

12.1 The test report shall include the following information:

12.1.1 Material identification: type, chemical specification, heat and processing treatment, hardness, and density. Processing conditions shall include method of casting (such as chill or sand); method of forming (such as forging or pressing and sintering); and the percent of ideal density (important for ceramics and powder metallurgy alloys).

12.1.2 Specimens: method of preparing and cleaning specimens, initial surface roughness, and number tested.

12.1.3 Eroding particle identification: size distribution, shape, composition, purity, source, and manufacturing method. Provide photograph of typical collection of particles. Reference (9) can be consulted for information on methods of characterization.

12.1.4 Test conditions: particle velocity (average) and method of determination, specimen orientation relative to the impinging stream, particle flow, particle flux, eroded area (size, shape), temperature of the specimen and particles and carrier gas, test duration, method of determining steady-state erosion conditions, carrier gas composition, and method of determining the mass of abrasive used.

12.1.5 Description of the test equipment.

12.1.6 Tabulation of erosion value and standard deviation for each specimen reported as a volume loss of material per unit mass of abrasive ($\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$).

12.2 Each test program shall include among the materials tested a reference material tested under the same conditions to permit calculation and report of the normalized erosion rate. A suitable reference material would be Type 1020 steel (see Table 1).

12.3 The report shall state clearly whether testing was done at standard conditions, shall itemize any deviations from those conditions, and shall indicate the frequency of calibration using reference materials.

12.4 Any special occurrences or observations during testing should be noted.

13. Precision and Bias

13.1 Absolute values of erosion rates of materials are generally not available because of the wide range of possible exposure conditions. The erosion measurement conditions established by this practice are designed to facilitate obtaining precise, reproducible data applicable to the test conditions employed. Interlaboratory test results utilizing this practice on well-characterized metal are given in Table 2. Examples of 95 % confidence limits for three erosion test conditions are shown in Table 2. For Condition A, a statement of precision would be: average erosion was $2.73 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$; 95 % repeatability limit was $1.31 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$; 95 % reproducibility limit was $2.26 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{g}$.

13.2 No bias can be assigned to this test method since there is no absolute accepted value for erosion rate.

13.3 *General Considerations*—Participants in the interlaboratory testing that led to the statements of precision and bias given above involve five laboratories, two different materials, two test conditions, and five replicate measurements each. Subsequent to this testing, described in Research Report # G02-1003 that is available from ASTM, data were received from another laboratory that utilized a commercial test machine. Those data were found consistent with the results of the interlaboratory study and will be included in the research report.

14. Keywords

14.1 erosion; erosion rate; gas jet; metal erosion; solid particle

REFERENCES

- (1) Young, J. P., and Ruff, A. W., *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of ASME*, Vol 99, 1977, pp. 121-125.
- (2) Hansen, J. S., in *Erosion: Prevention and Useful Applications*, Adler, W. F., ed., *ASTM STP 664*, 1979, pp. 148-162.
- (3) Finnie, I., Levy, A., and McFadden, D. H., in *Erosion: Prevention and Useful Applications*, Adler, W. F., ed., *ASTM STP 664*, 1979, pp. 36-58.
- (4) Wood, F.W., *Journal of Testing and Evaluation*, 14, 1986.
- (5) Preece, C. M., ed., *Erosion: Treatise on Materials Science and Technology*, Vol 16 Academic Press, New York, NY, 1979.
- (6) Finnie, I., Wolak, J., and Kabil, Y., *Journal of Materials*, Vol 2, 1967, pp. 682-700.
- (7) Ninham, A.J., and Hutchins, I.M., *Proceedings of the 6th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact* (Univ. of Cambridge, 1983) pp. 50-51.
- (8) Barkalow, R. H., Goebel, J. A., and Pettit, F. S., in *Erosion: Prevention and Useful Applications*, Adler, W. F., ed., *ASTM STP 664*, 1979, pp. 163-192.
- (9) Allen, T., *Particle Size Measurement*, Chapman and Hall, London, 1974.
- (10) Ponnaganti, V., Stock, D.E., and Sheldon, G.L., *Proceedings on Symposium Polyphase Flow and Transport Tech.* (ASME) NY, 1980 pp 195-199.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Bogotá, 05 de Abril de 2016

Señores: **Nicolás Benavides**
Ciudad

Dando respuesta a su amable solicitud de cotización con referencia a:

FABRICACION CONO PEQUEÑO

Material Inoxidable

Valor unitario \$ 70.000 + IVA

FABRICACION CONO GRANDE

Valor unitario \$ 160.000 + IVA

Tiempo de entrega A convenir
Forma de pago 50% anticipo
50% contra entrega

Cordial saludo,

Henry Valcárcel
Gerente General

Dirección Calle 4 N° 33-21 PBX: 277 4331- 566 15 38
Móvil 3103222726 - 3204399612
E/mail: gerencia@hverosionados.com
www.hverosionados.com



Bogotá, 19 de Marzo de 2016

Señores: **NICOLAS BENAVIDES**
Ciudad

Dando respuesta a su amable solicitud de cotización con referencia a:

FABRICACION TAPON SEGÚN PLANOS

Material Inoxidable

Valor unitario \$ 60.000 + IVA

FABRICACION BOQUILLA SEGÚN PLANOS

Material Inoxidable

Valor unitario \$ 180.000 + IVA

FABRICACION VENTURY SEGÚN PLANOS

Material Inoxidable

Valor unitario \$ 230.000 + IVA

Tiempo de entrega 3 días hábiles
Forma de pago Contra entrega

Cordial saludo,

Henry Valcárcel
Gerente General

Dirección Calle 4 N° 33-21 PBX: 277 4331- 566 15 38
Móvil 3103222726 - 3204399612
E/mail: gerencia@hverosionados.com
www.hverosionados.com

STORE DATA : 2329
 ORDEN DE TRABAJO : INTERNA
 COMPANIA : ESTUDIANTE
 ENTERANTE : MAURICIO SIERRA
 FIRMA ANALISTA :
 ANALISTA : JHON JAIRD CASTANEDA BOCANEGRA
 FIRMA JEFE LAB :
 JEFE LABORATORIO : ING. EDGAR ESPEJO MORA
 REFERENCIA : MUESTRA 2
 Alloy : LAB2010 Mode :PA 16-Jun-2015 Time 10:39

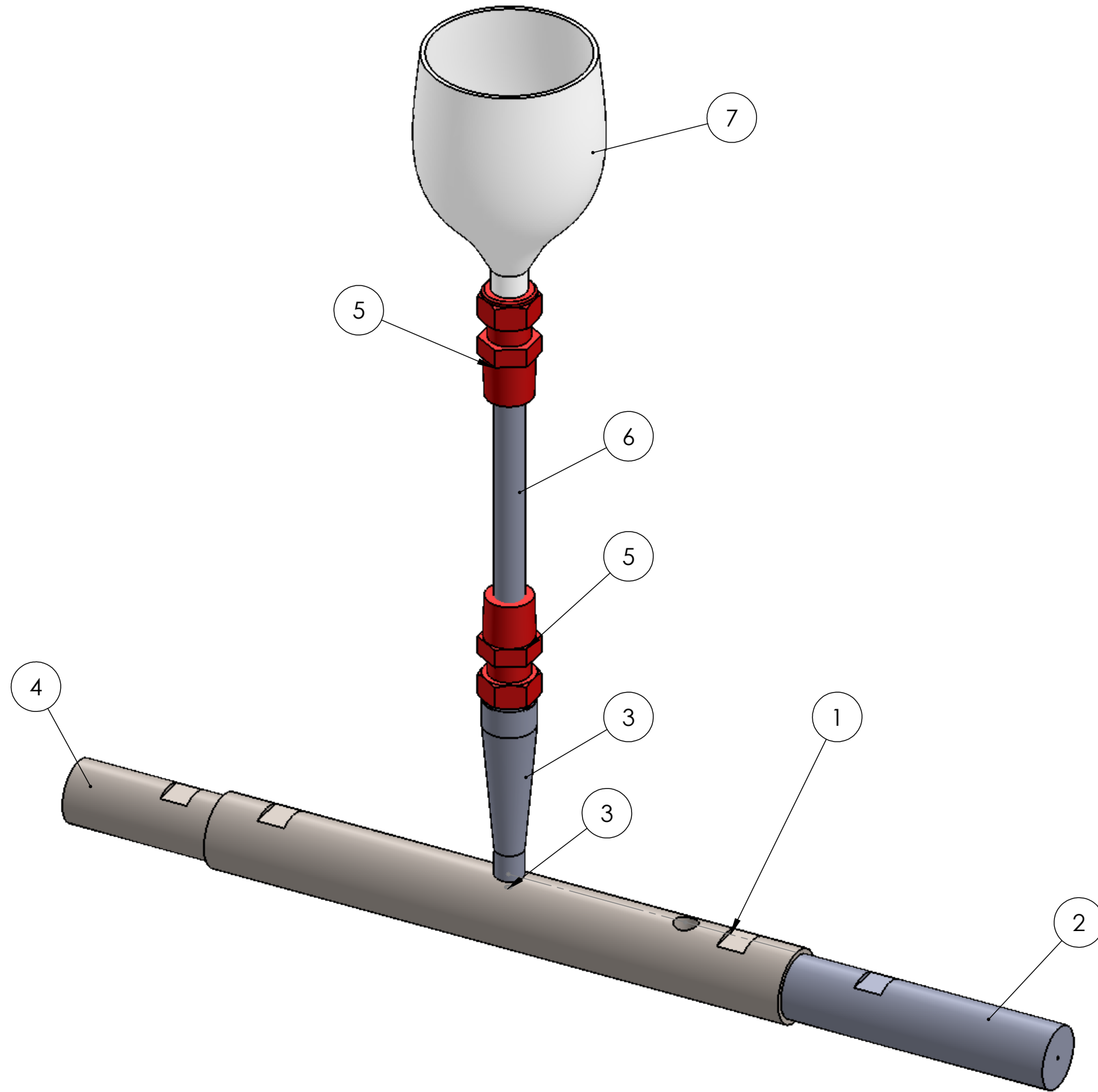
Burn 1
 Fe 97.418 C 0.376 Mn 0.781 P 0.006 S 0.005
 Si 0.178 Cu 0.011 Ni 0.016 Cr 0.989 V 0.002
 Mo 0.174 W < 0.005 Co 0.005 Ti 0.003 Sn< 0.001
 Al 0.029 Nb< 0.002 B 0.0002 Pb 0.005 Mg 0.000

Burn 2
 Fe 97.441 C 0.362 Mn 0.775 P 0.007 S 0.005
 Si 0.179 Cu 0.011 Ni 0.016 Cr 0.984 V 0.002
 Mo 0.172 W < 0.005 Co 0.003 Ti 0.003 Sn< 0.001
 Al 0.030 Nb< 0.002 B 0.0014 Pb 0.006 Mg 0.000


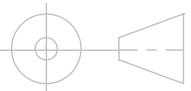
Burn 3
 Fe 97.387 C 0.372 Mn 0.793 P 0.008 S 0.006
 Si 0.186 Cu 0.011 Ni 0.017 Cr 0.995 V 0.003
 Mo 0.175 W < 0.005 Co 0.006 Ti 0.003 Sn< 0.001
 Al 0.030 Nb< 0.002 B 0.0003 Pb 0.007 Mg 0.000

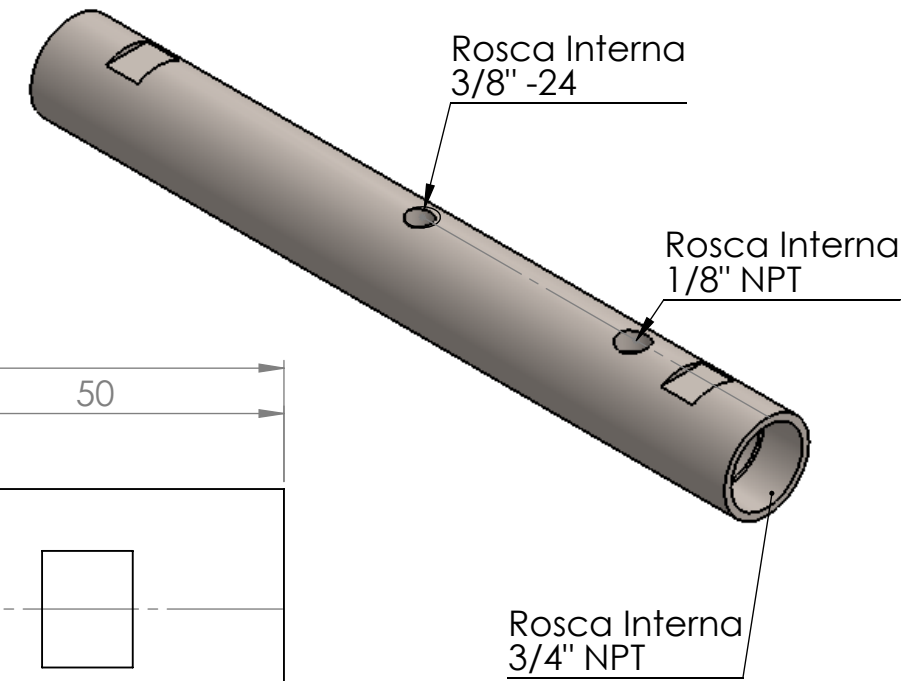
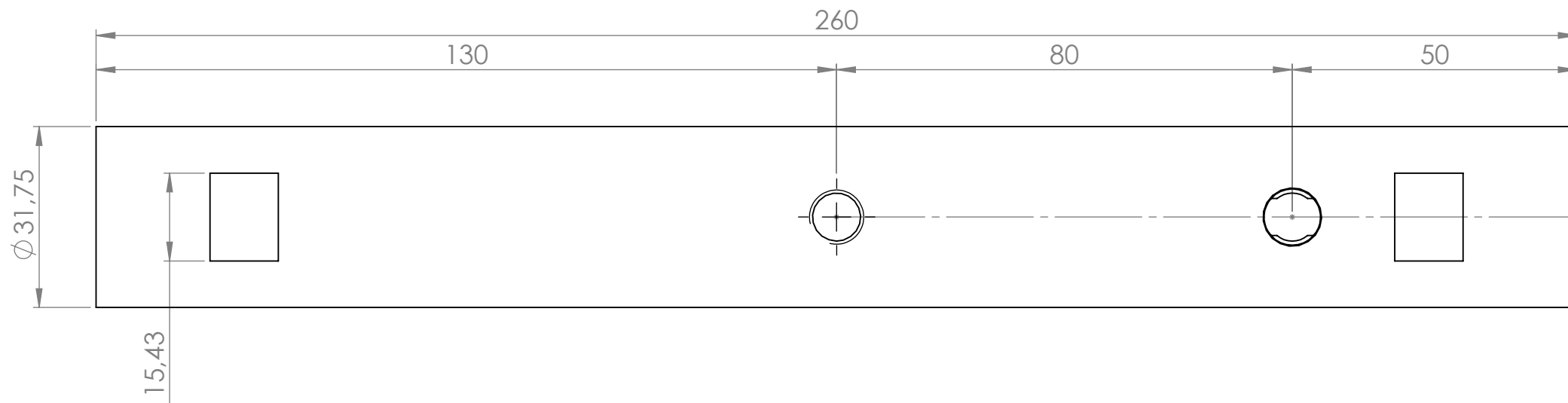
Burn 4
 Fe 97.322 C 0.397 Mn 0.807 P 0.010 S 0.007
 Si 0.189 Cu 0.011 Ni 0.017 Cr 1.013 V 0.003
 Mo 0.180 W < 0.005 Co 0.006 Ti 0.003 Sn< 0.001
 Al 0.028 Nb< 0.002 B 0.0004 Pb 0.007 Mg 0.000

Average
 Fe 97.392 C 0.377 Mn 0.789 P 0.008 S 0.006
 Si 0.183 Cu 0.011 Ni 0.017 Cr 0.995 V 0.003
 Mo 0.175 W < 0.005 Co 0.005 Ti 0.003 Sn< 0.001
 Al 0.029 Nb< 0.002 B 0.0006 Pb 0.006 Mg 0.000

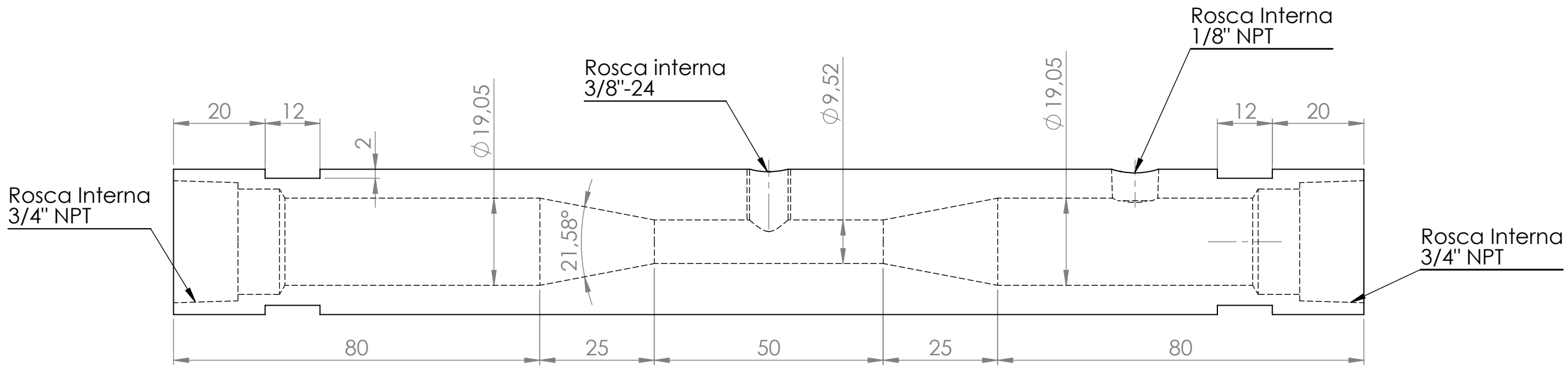



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Venturi	1
2	Boquilla	1
3	Ensamblaje conos	1
	Cono de alimentación	1
	Cono reductor	1
4	tubo de acople	1
5	MALE CONNECTOR (válvulas)	2
6	niple	1
7	tolva	1

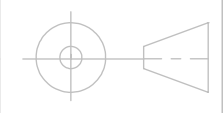
A3	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.		
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016	
MATERIAL:			Nº de Plano:
EQUIPO: Tribómetro		TITULO: Conjunto Disparo de Mezcla	Escala: 1:2 Unidades: mm
			

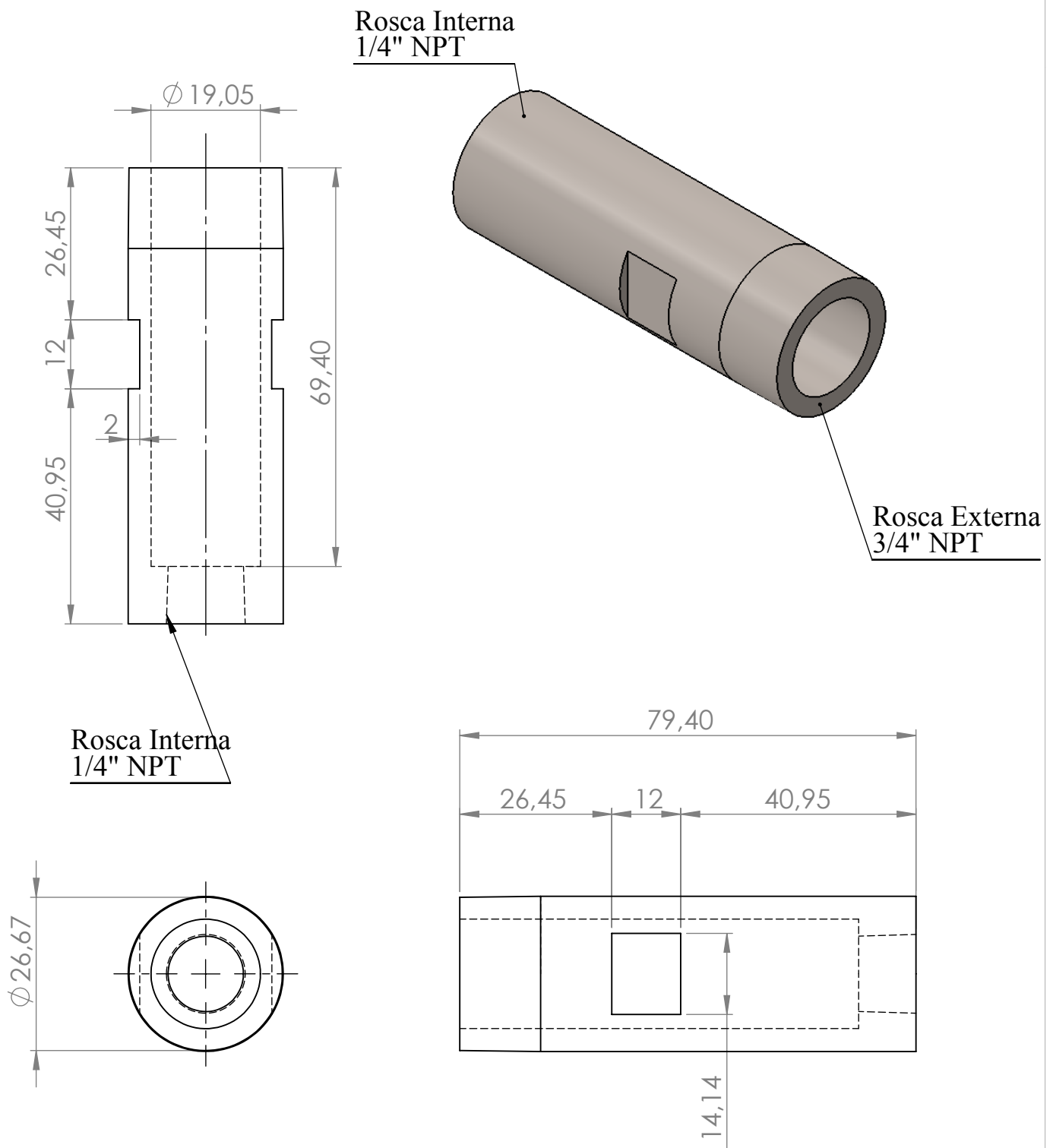



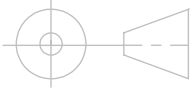
ESCALA 1:2

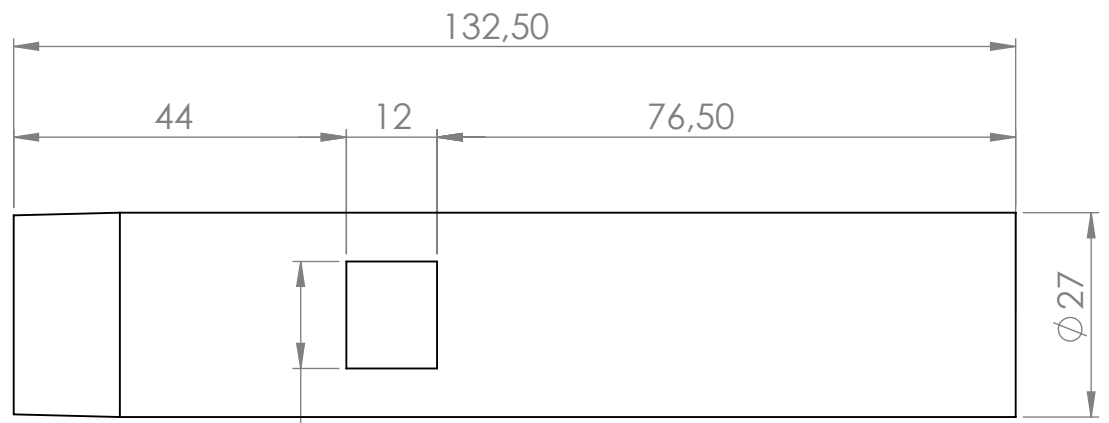


A3	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.	20-07-2016	
REVISÓ	Nicolás Benavides A.		
MATERIAL: AISI 316 ACERO INOXIDABLE			N° de Plano: 9
EQUIPO: Tribómetro		TITULO: Tubo Venturi	
			Escala: 1:1 Unidades: mm

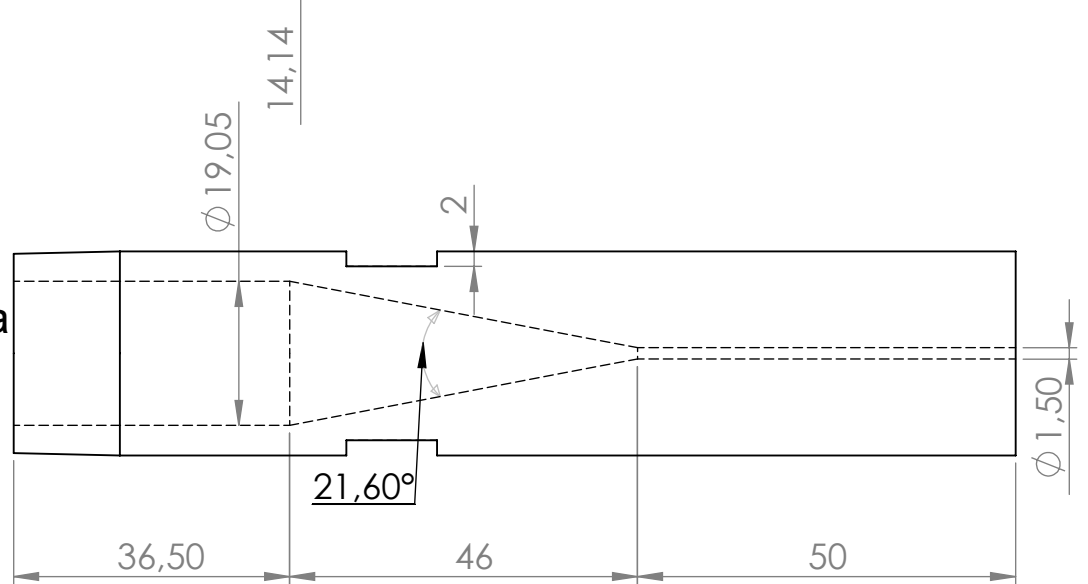




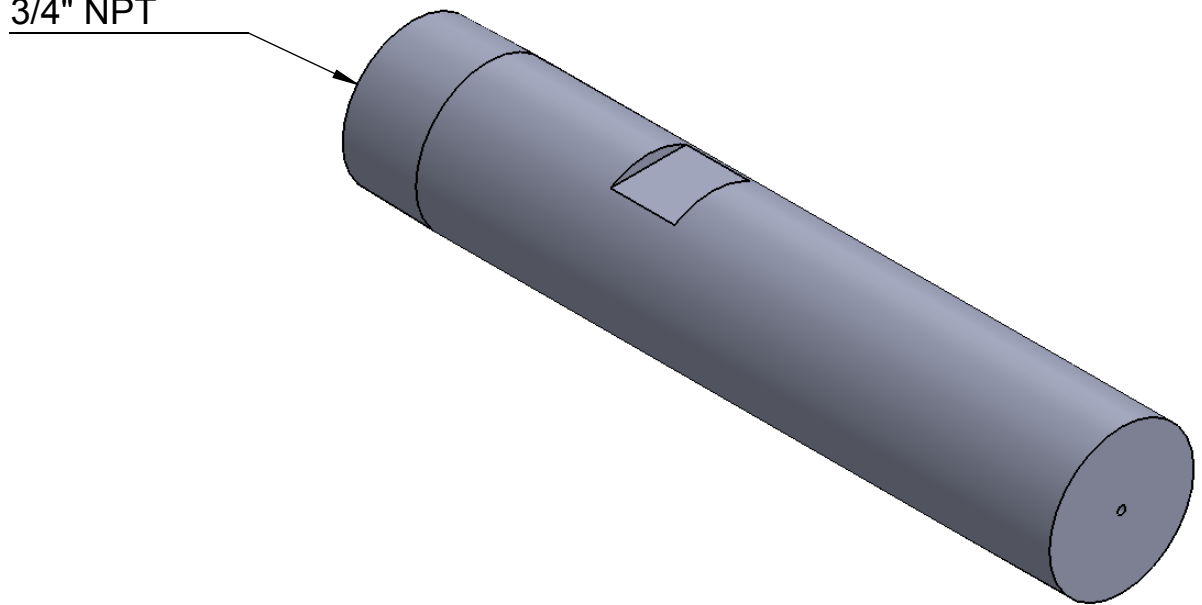
A4	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.		
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016	
MATERIAL: AISI 316 ACERO INOXIDABLE			N° de Plano:
EQUIPO:	TITULO:	Escala:	
Tribómetro	Tubo Acople	1:1	
		Unidades:	mm


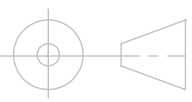


Rosca Externa
3/4" NPT

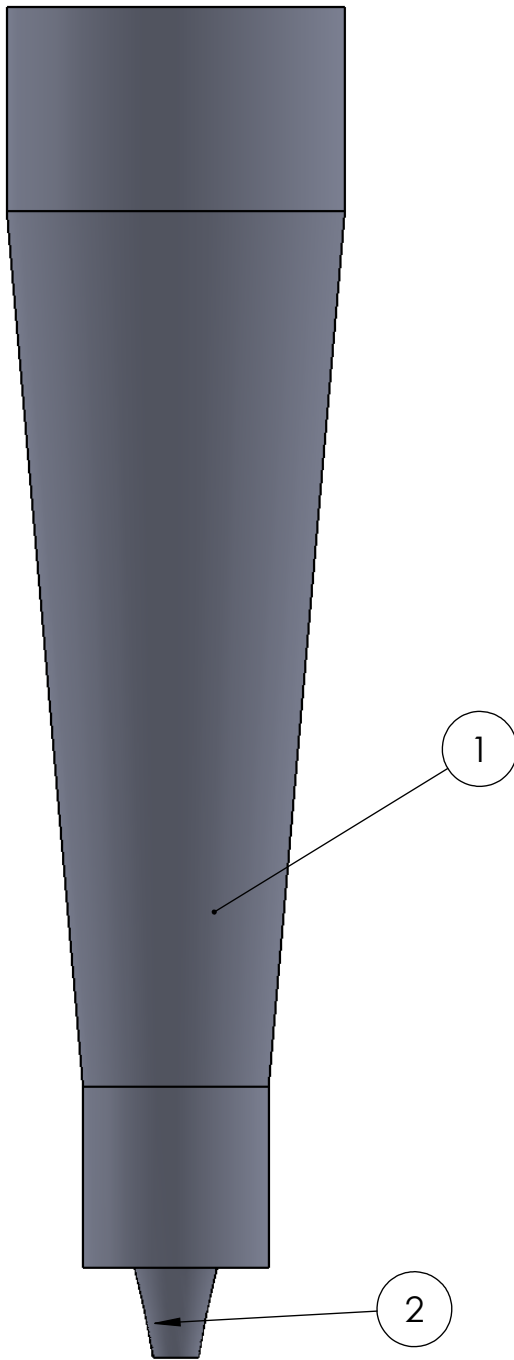




Rosca Externa
3/4" NPT

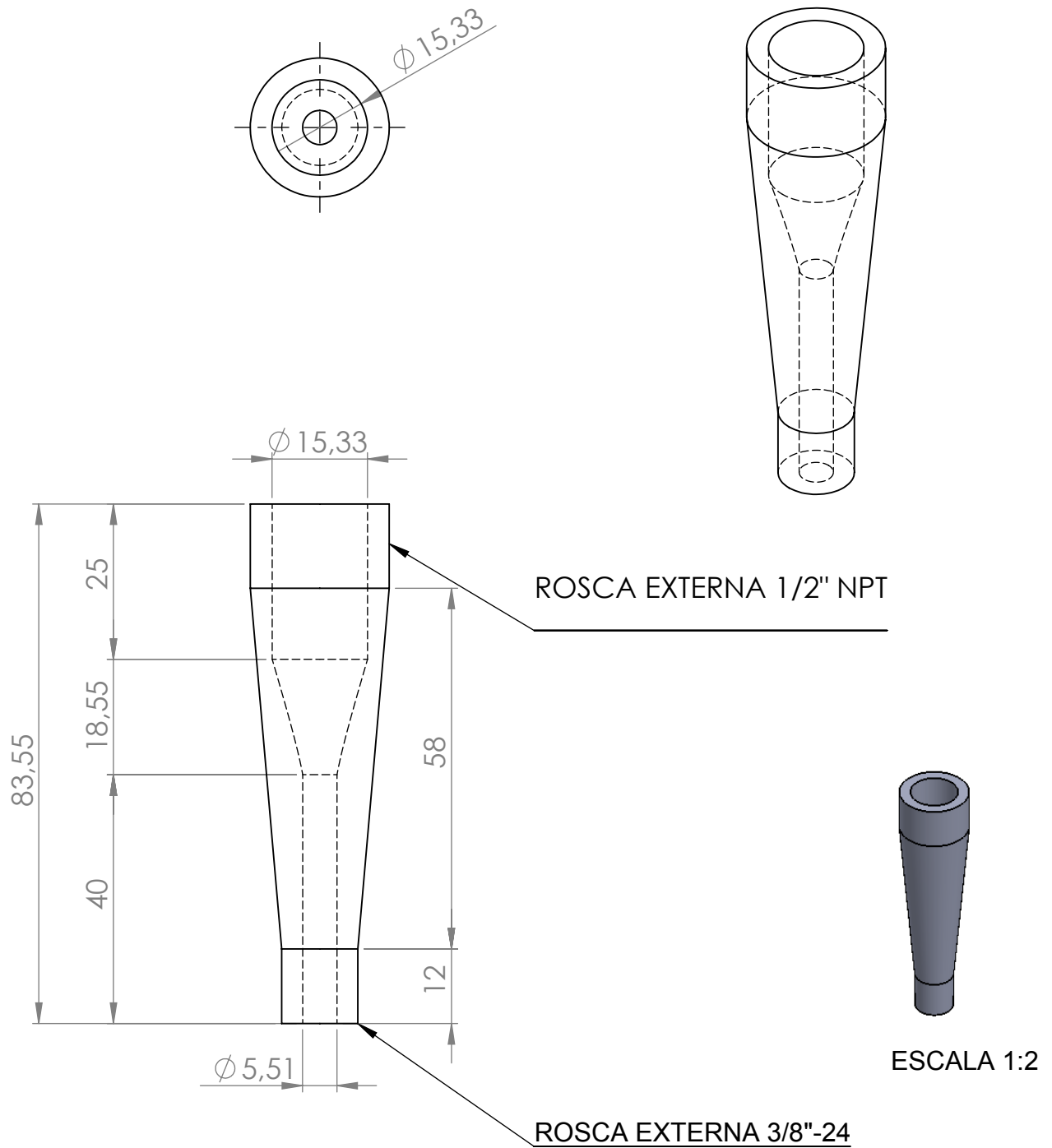




A4	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA	
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.			
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016		
MATERIAL: AISI 316 ACERO INOXIDABLE			N° de Plano:	
EQUIPO: Tribómetro		TITULO: Boquilla	Escala: 1:1	
			Unidades: mm	

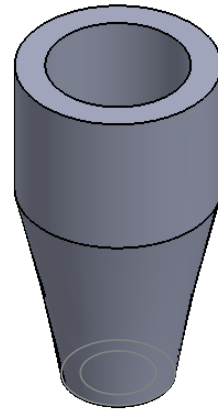
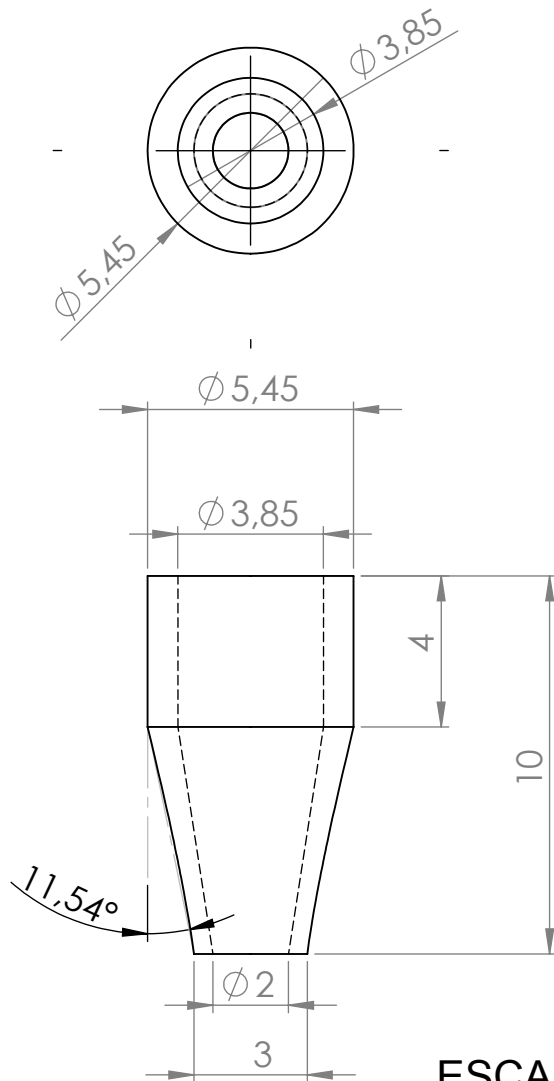
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Cono de alimentación	1
2	Cono reductor	1




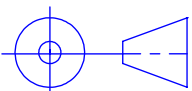
A4	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA	
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.			
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016		
MATERIAL: AISI 316 ACERO INOXIDABLE			Nº de Plano:	
EQUIPO: Tribómetro		TITULO: Ensamble Conos	Escala: 2:1 Unidades: mm	

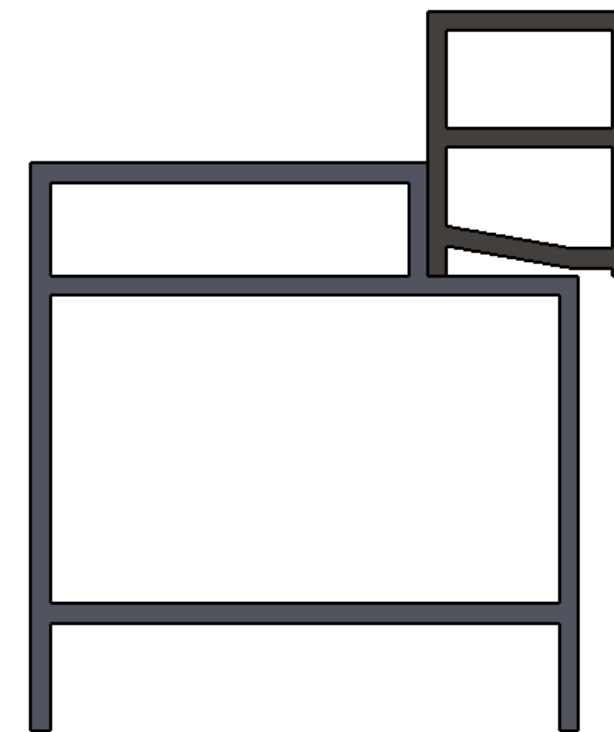
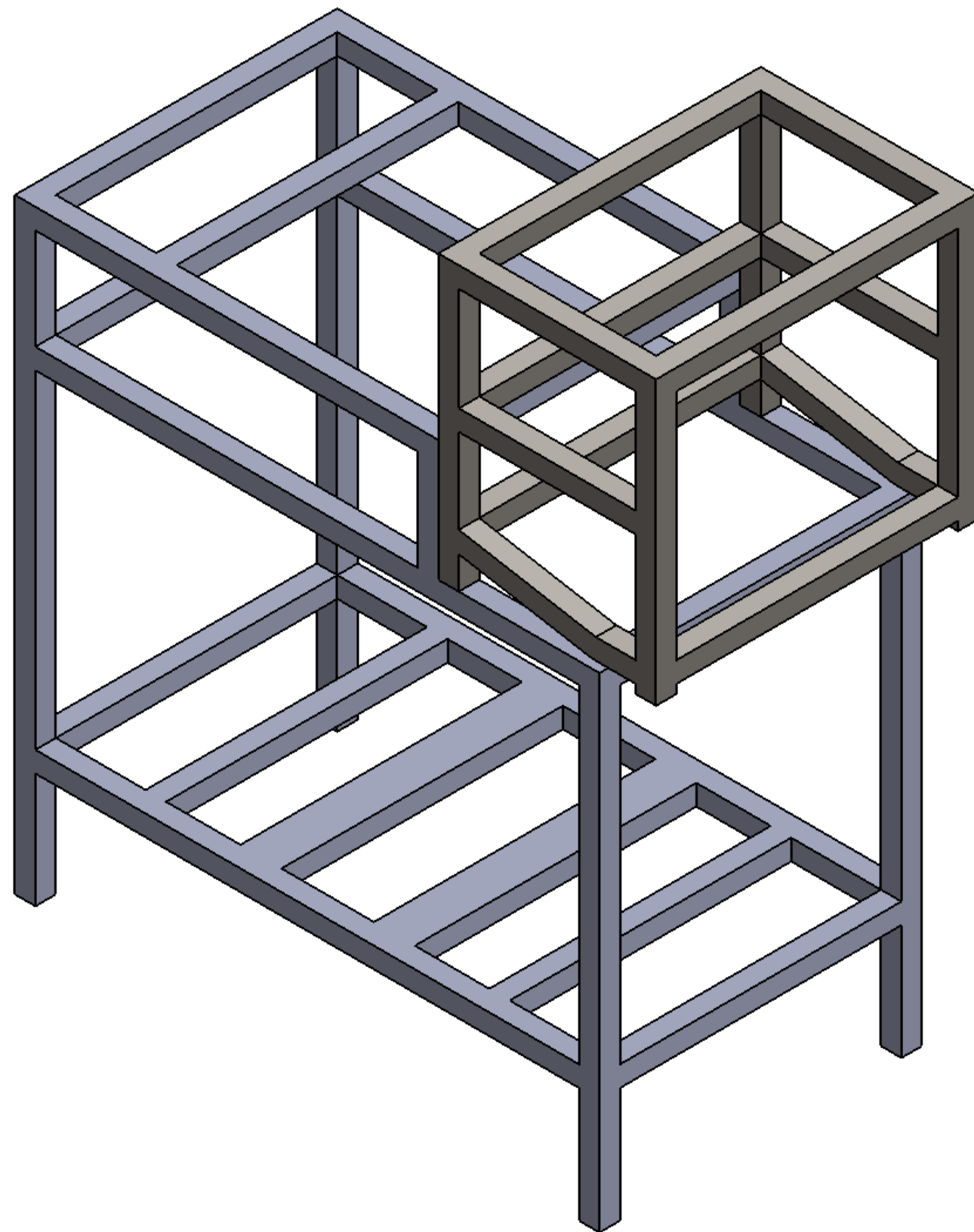


A4	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.	20-07-2016	
REVISÓ	Nicolás Benavides A.		
MATERIAL: AISI 316 ACERO INOXIDABLE			N° de Plano:
EQUIPO:	TITULO:	Escala: 1:1	
Tribómetro	Cono de Suministro	Unidades: mm	


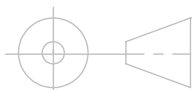


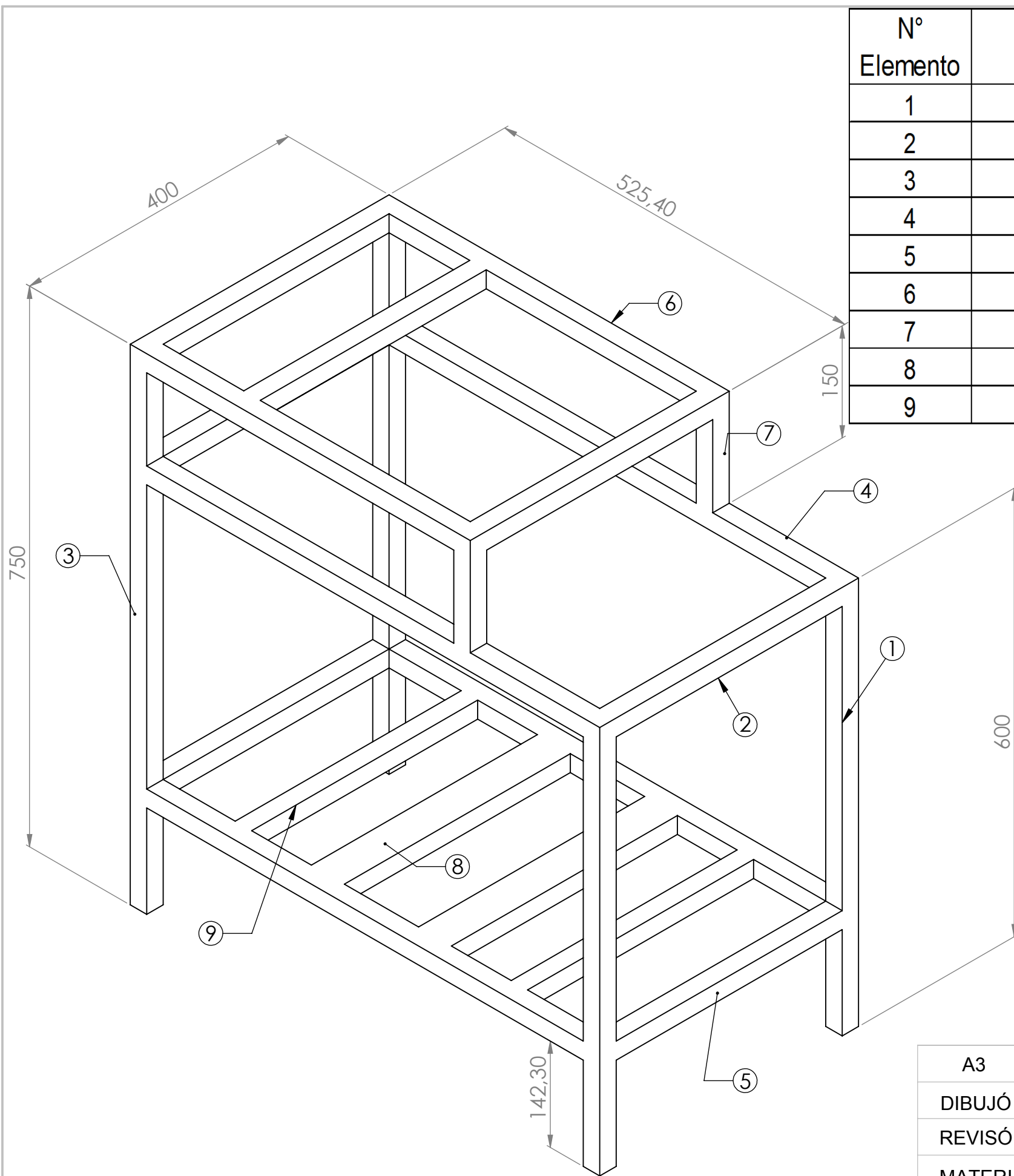
ESCALA 5:1

A4	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA	
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.			
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016		
MATERIAL: AISI 316 ACERO INOXIDABLE			N° de Plano:	
EQUIPO: Tribómetro		TITULO: Cono Reductor	Escala: 1:1	
			Unidades: mm	




ESCALA 1:10

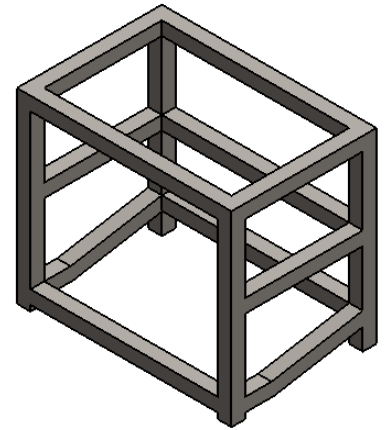
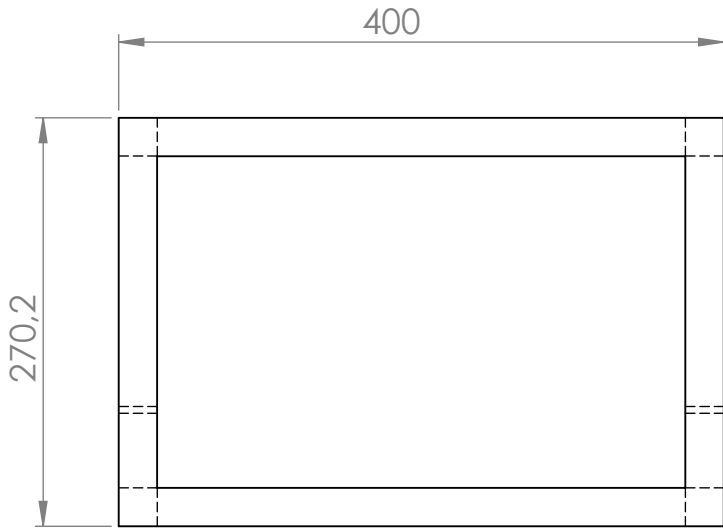
A3	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.		
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016	
MATERIAL: ACERO			N° de Plano:
EQUIPO:	TITULO:		Escala: 1:5
	Tribómetro	Ensamble Estructura	Unidades: mm
			



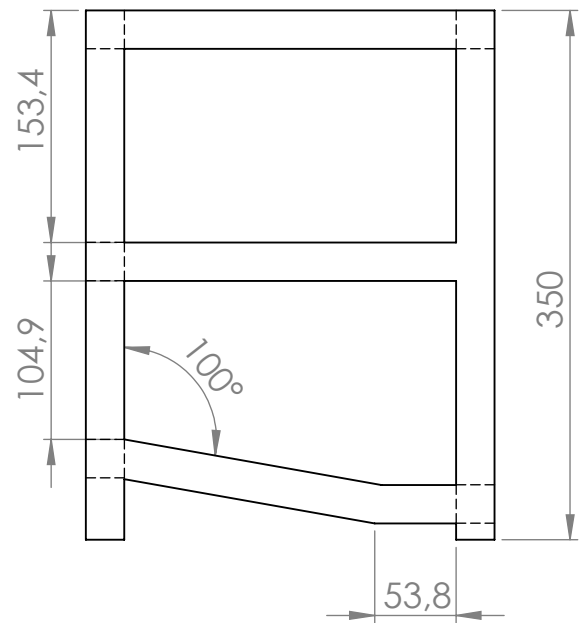
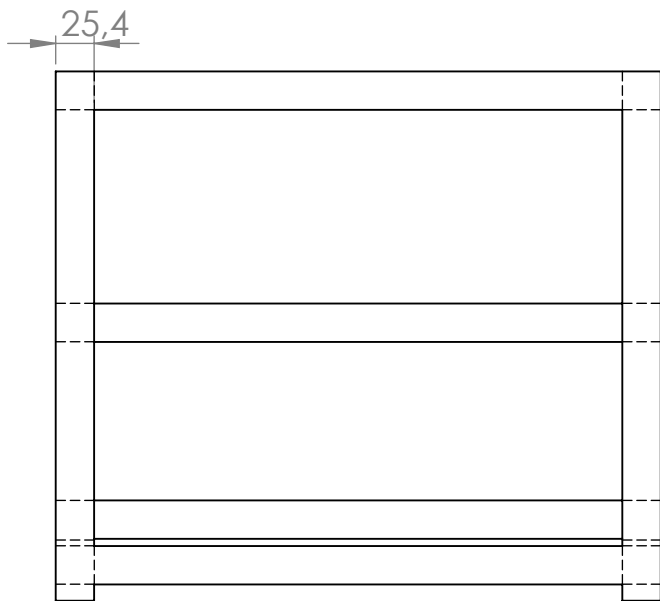
N° Elemento	Descripción	Corte	Cantidad	Longitud Corte (mm)
1	Tubo cuadrado de 1"	90° y 45°	2	600
2	Tubo cuadrado de 1"	45° y 45°	3	400
3	Tubo cuadrado de 1"	90° y 90°	2	724,6
4	Tubo cuadrado de 1"	90° y 90°	4	674,6
5	Tubo cuadrado de 1"	90° y 90°	3	349,2
6	Tubo cuadrado de 1"	45° y 45°	2	525,4
7	Tubo cuadrado de 1"	90° y 90°	2	124,6
8	Tubo cuadrado de 1"	90° y 90°	2	349,2
9	Tubo cuadrado de 1"	90° y 90°	2	349,2


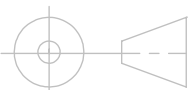
A3	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.		
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016	
MATERIAL: ACERO			N° de Plano:
EQUIPO: Tribómetro		TITULO: Estructura	Escala: 1:5
			Unidades: mm

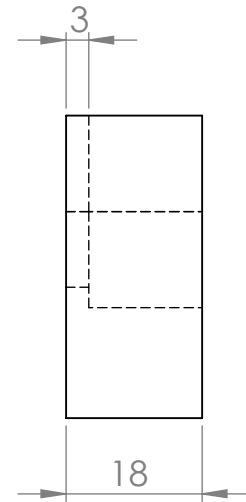
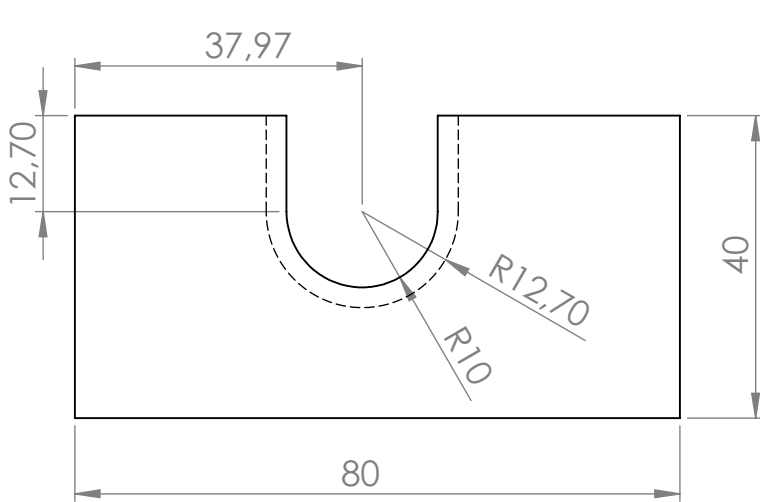
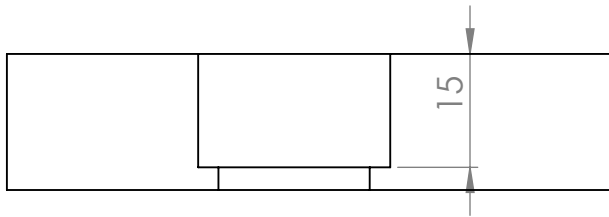
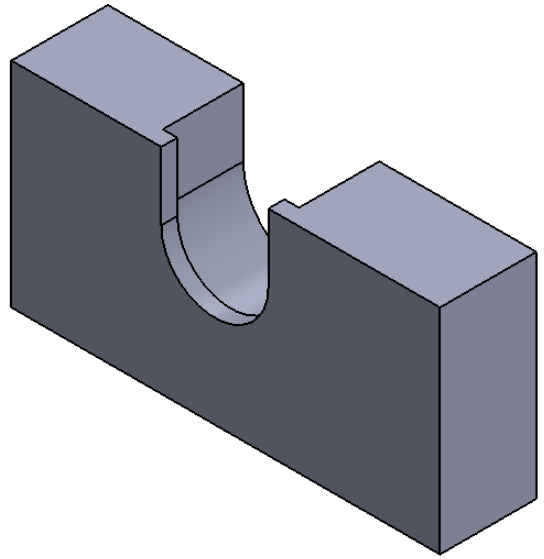



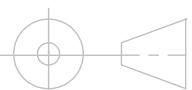


ESCALA 1:10



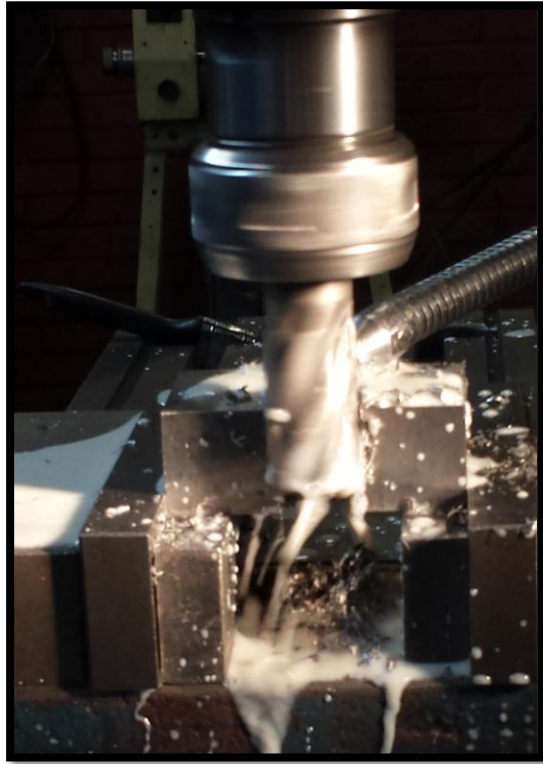
A4	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA	
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.			
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016		
MATERIAL: ACERO			N° de Plano:	
EQUIPO: Tribómetro		TITULO: Zona de Erosión	Escala: 1:5	
			Unidades: mm	

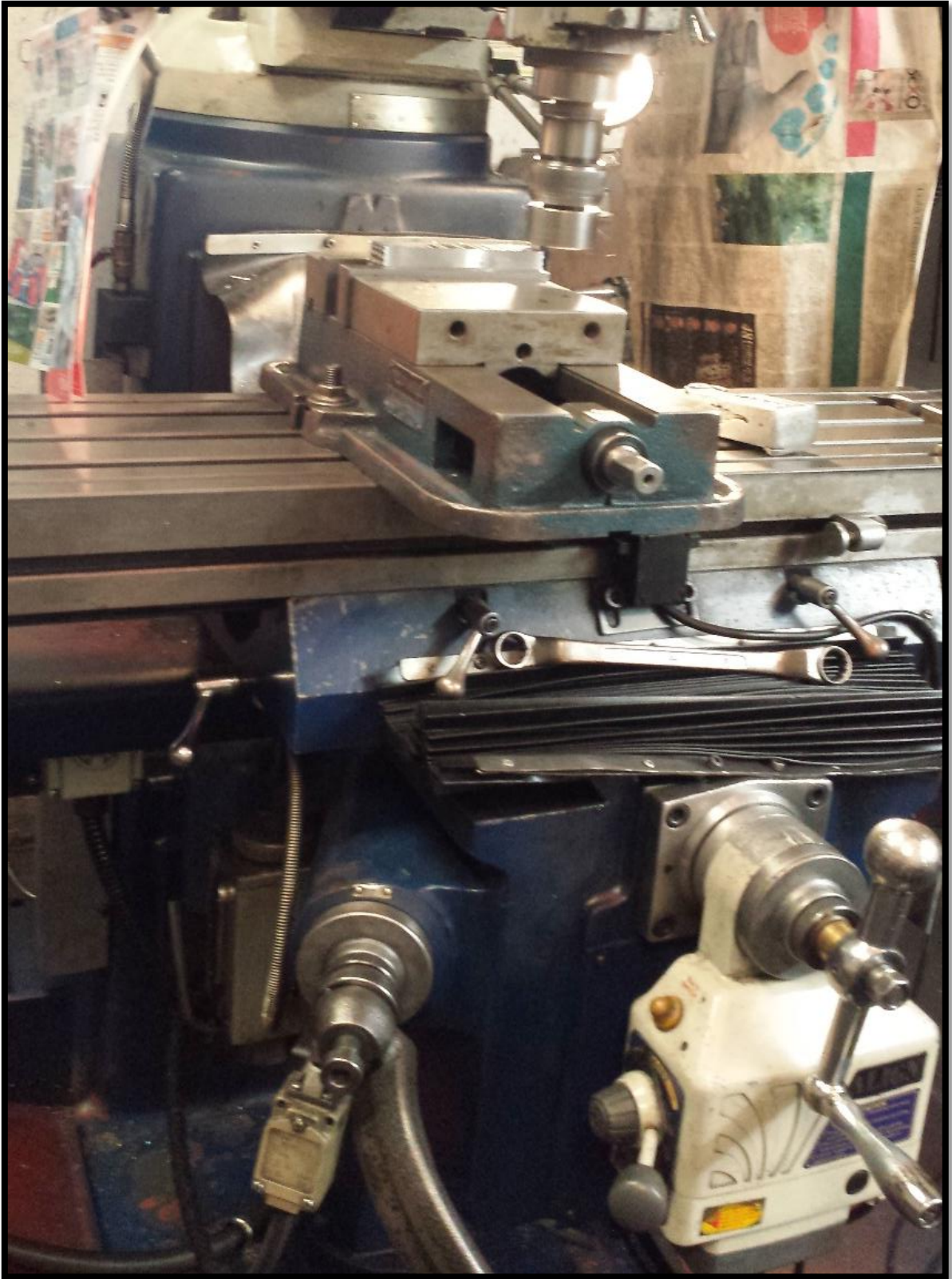


A4	NOMBRE	FECHA	 UNIVERSIDAD LIBRE DE COLOMBIA
DIBUJÓ	Bryan Andrés Jiménez V.		
REVISÓ	Nicolás Benavides A.	20-07-2016	
MATERIAL: ACERO HOT ROLLED			N° de Plano:
EQUIPO:	TITULO:	Escala: 1:1	
Tribómetro	Portaprobeta	Unidades: mm	

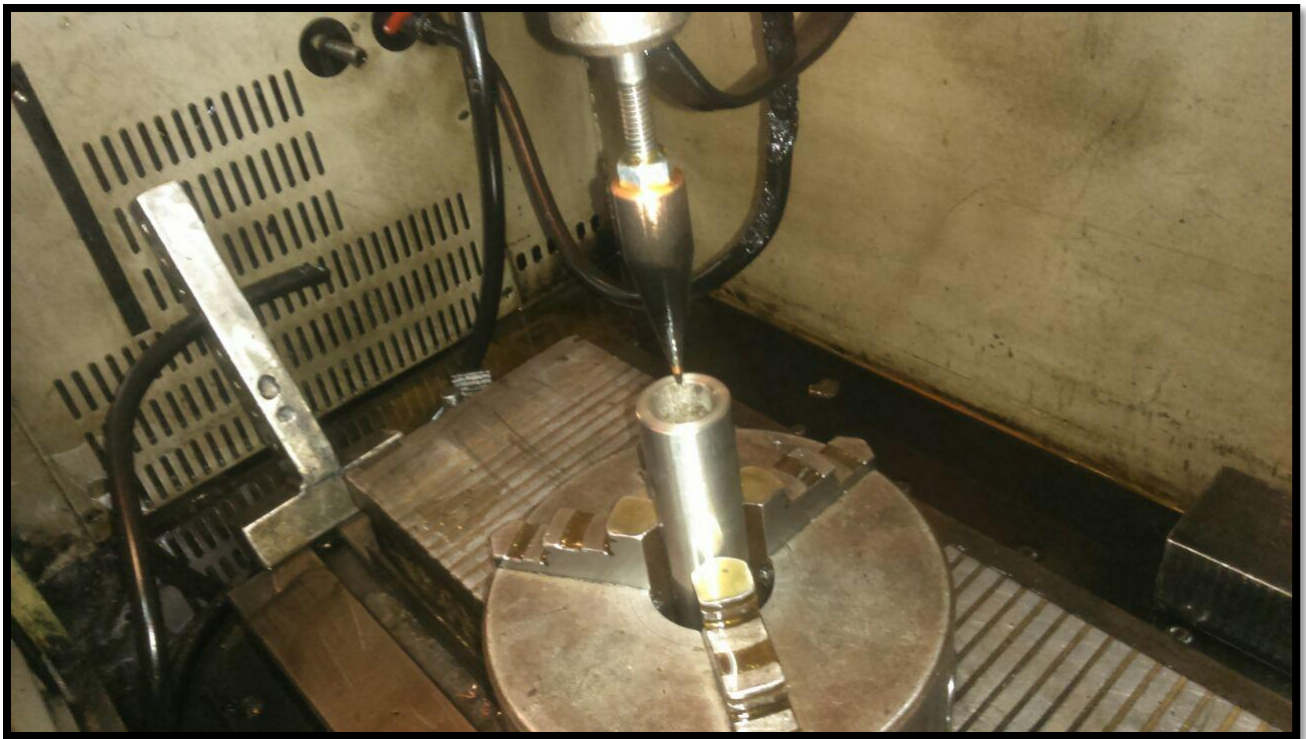
FOTOGRAFÍAS FABRICACIÓN PORTA-PROBETAS

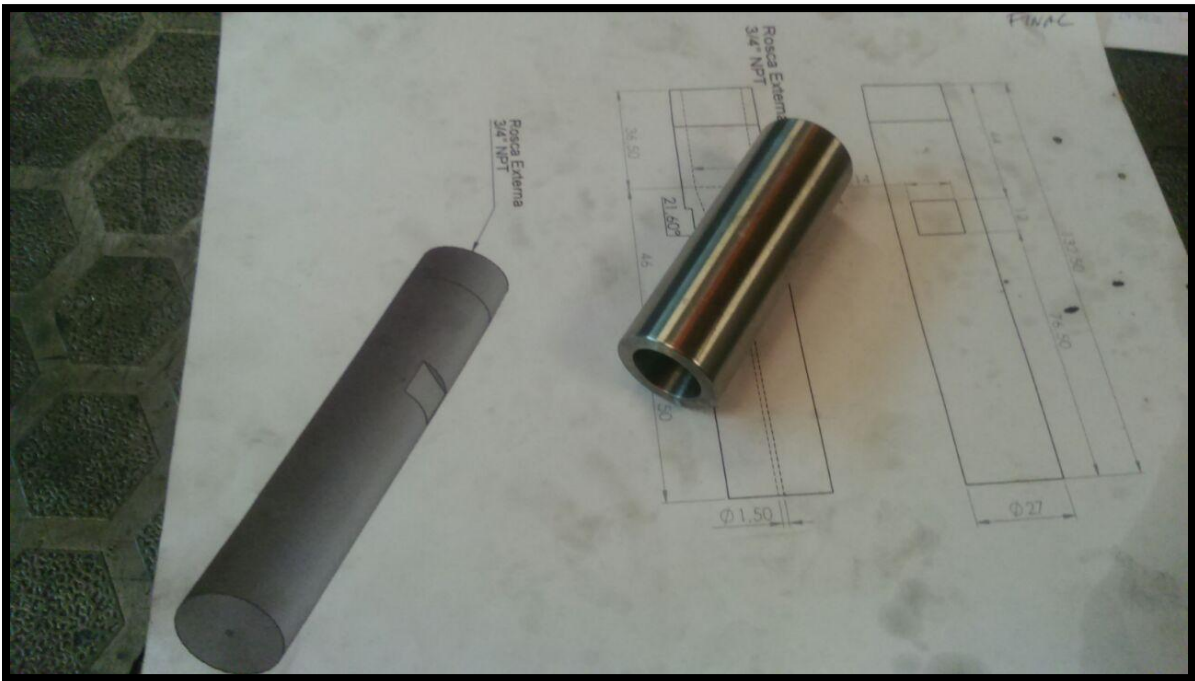


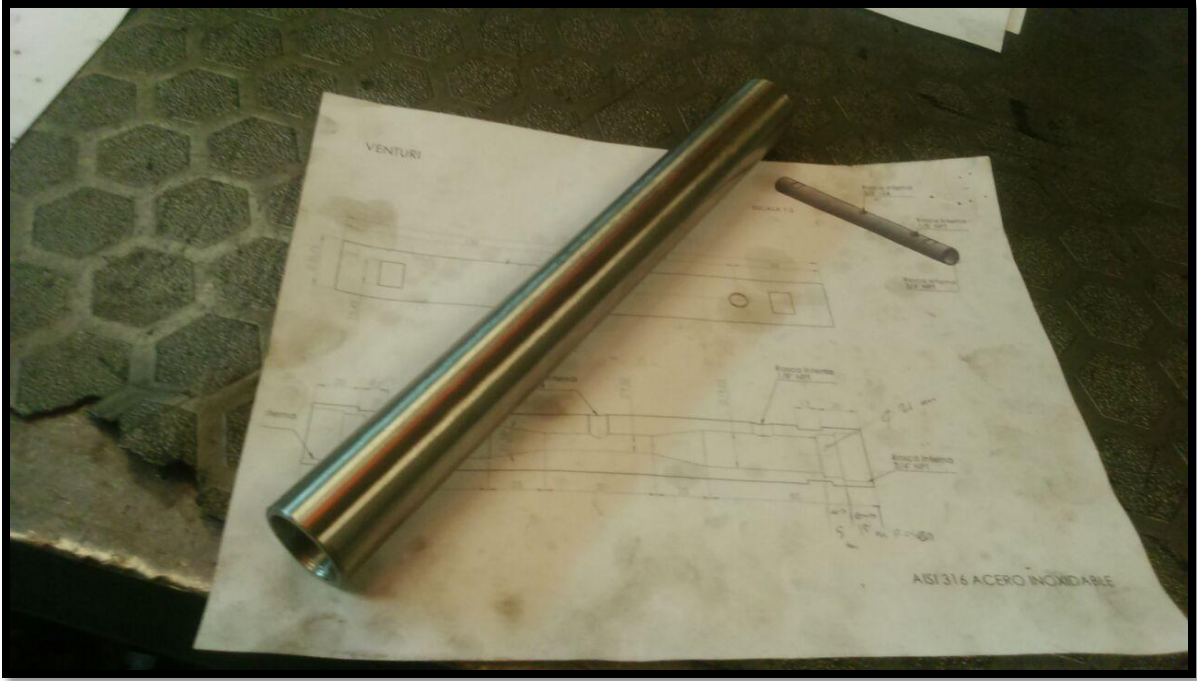




FOTOGRAFÍAS ELECTROEROSIÓN







FOTOGRAFÍAS FABRICACIÓN ESTRUCTURA











MANUAL DE USO



TRIBOMETRO

ENSAYO DESGASTE EROSIVO POR PARTICULAS SÓLIDAS

MANUAL DE USO



1. INTRODUCCIÓN

En el presente manual del usuario, encontrará las pautas, condiciones y recomendaciones necesarias para hacer un buen uso del equipo y por ende realizar a satisfacción su ensayo de Desgaste erosivo por partículas sólidas.

2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El TRIBOMETRO de la Universidad Libre, es un equipo enfocado a la investigación, de temas relacionados con ensayos de desgaste erosivo en superficies, ya que por medio de aire a presión dispara, material particulado con condiciones especiales como: forma, tamaño y dureza; hacia diferentes blancos a atacar, con esto poder hacer análisis posteriores de pérdida volumétrica en los materiales. Así mismo poder comparar la resistencia al desgaste en diferentes materiales.

3. PRECAUCIONES

- Las conexiones de las diferentes partes de la máquina se deben hacer con las herramientas adecuadas.
- Antes de energizar el suministro de aire a la máquina verifique que las condiciones de la manguera sean óptimas para su uso.
- Es recomendable purgar el filtro de condensados en la unidad reguladora de presión con una frecuencia entre ensayos.
- Es importante verificar los manómetros de presión en la máquina para estar seguros de que las condiciones establecidas para el ensayo se cumplan.
- Maneje con cuidado las válvulas de paso de material particulado ya que se puede ver afectado el ensayo.
- Verifique la correcta sujeción de la probeta en el porta-probetas.
- Verifique la correcta ubicación entre el porta-probetas, la boquilla y la superficie a impactar.
- Cerciórese que el porta-probetas no posee ningún juego ni tolerancia, ya que un mínimo movimiento puede dañar la huella esperada en la superficie de la probeta ensayada.
- La limpieza periódica de la máquina es primordial para su conservación y buen uso.

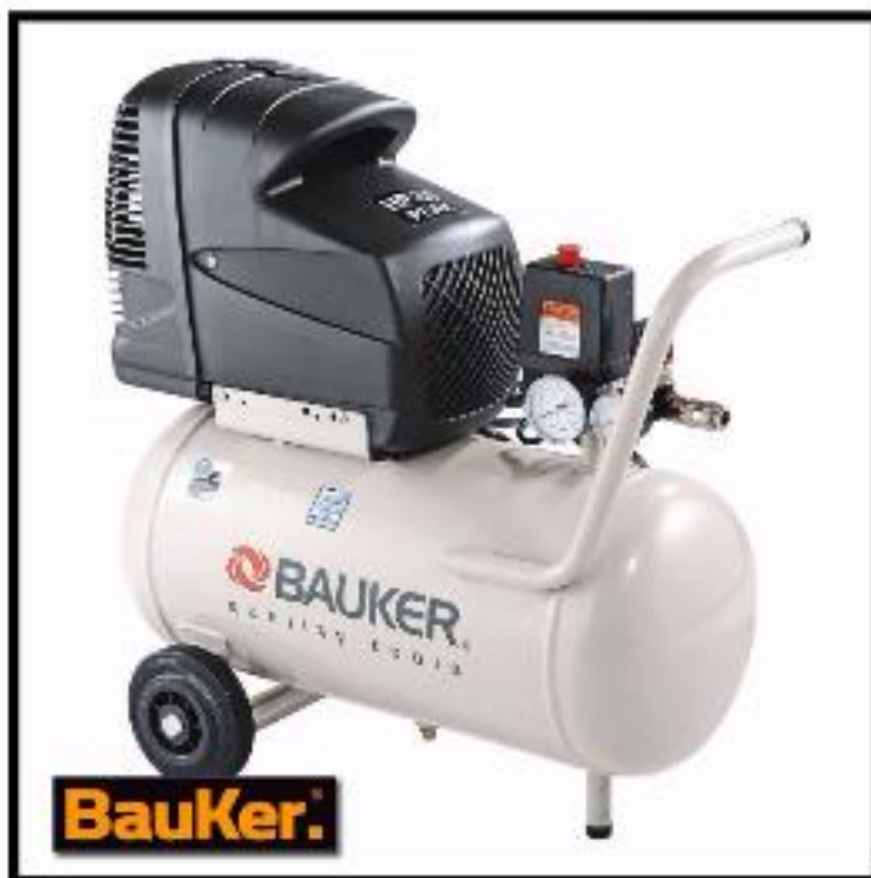
MANUAL DE USO



4. COMPONENTES DEL TRIBOMETRO

4.1 Conjunto entrada de aire

COMPRESOR



CARACTERISTICAS		OBSERVACIONES
ATRIBUTO	DETALLE	
Potencia Máxima	2 HP	<p>ES RECOMENDABLE :</p> <ul style="list-style-type: none">• Conectar el equipo a una toma corriente en solitario para evitar sobrecargas.• Verificar los manómetros de presión incluidos en el equipo.• En caso de falla en el compresor, verifique el breaker incluido en la parte superior.
Capacidad	25 Litros	
Material	Metal	
Velocidad	3400 RPM	
Voltaje	110 v	
Presión PSI	116	
Caudal/ minuto	6 CFM	
Pertenece a	Ing. Héctor Rojas	

MANUAL DE USO



REGULADOR DE PRESIÓN



CARACTERISTICAS	OBSERVACIONES
Instalación sencilla	<ul style="list-style-type: none">• Es recomendable ser precavido con las conexiones de entrada y de salida de aire.<ul style="list-style-type: none">• Colocar el seguro de la perilla del regulador después de encontrar la presión deseada en el sistema• Purgar la válvula de condensados con regularidad para evitar condensados en las vías de conducto de la máquina y la superficie de la probeta a desgastar erosivamente.
Conectores de 6 mm (1/4") BSP hembra	
Depósito de acumulación de agua de 150 ml	
Presión de trabajo de hasta 10 Bares o 154 PSI	

MANUAL DE USO



TOLVA DE ALMACENAMIENTO

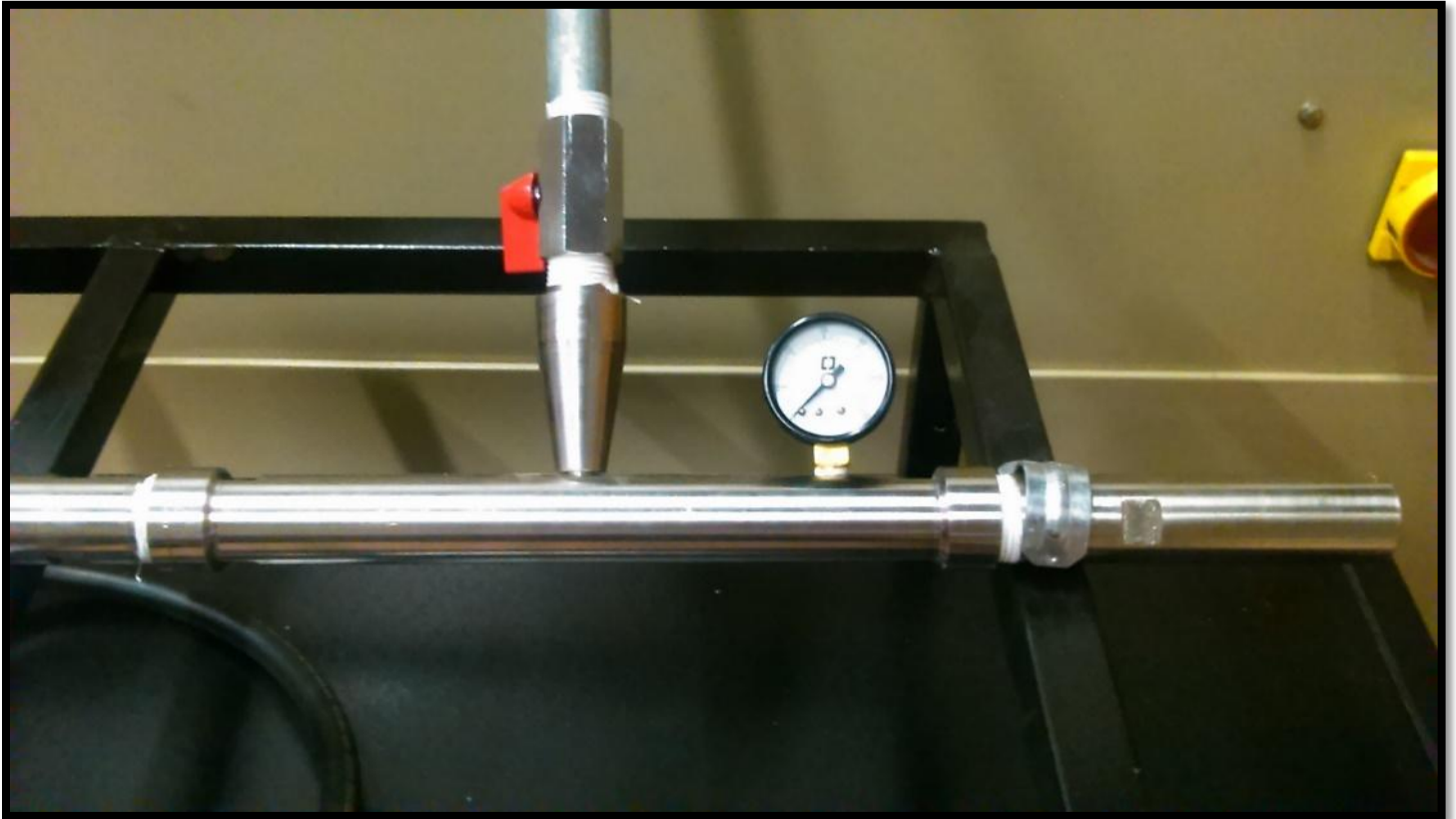


CARACTERISTICAS		OBSERVACIONES
Material	Polietileno	<ul style="list-style-type: none">• Es recomendable hacer una limpieza en el vaso y la tapa ya que se puede encontrar cúmulos de material.• Cerrar de manera correcta la tapa para evitar desperdicios de material por el mal manejo del equipo• Según se solicite es recomendable introducir la cantidad de material a impactar.
Capacidad	1200 gm	
Rosca de salida	1/2 "	

MANUAL DE USO



4.2 Conjunto de disparo de la mezcla



OBSERVACIONES

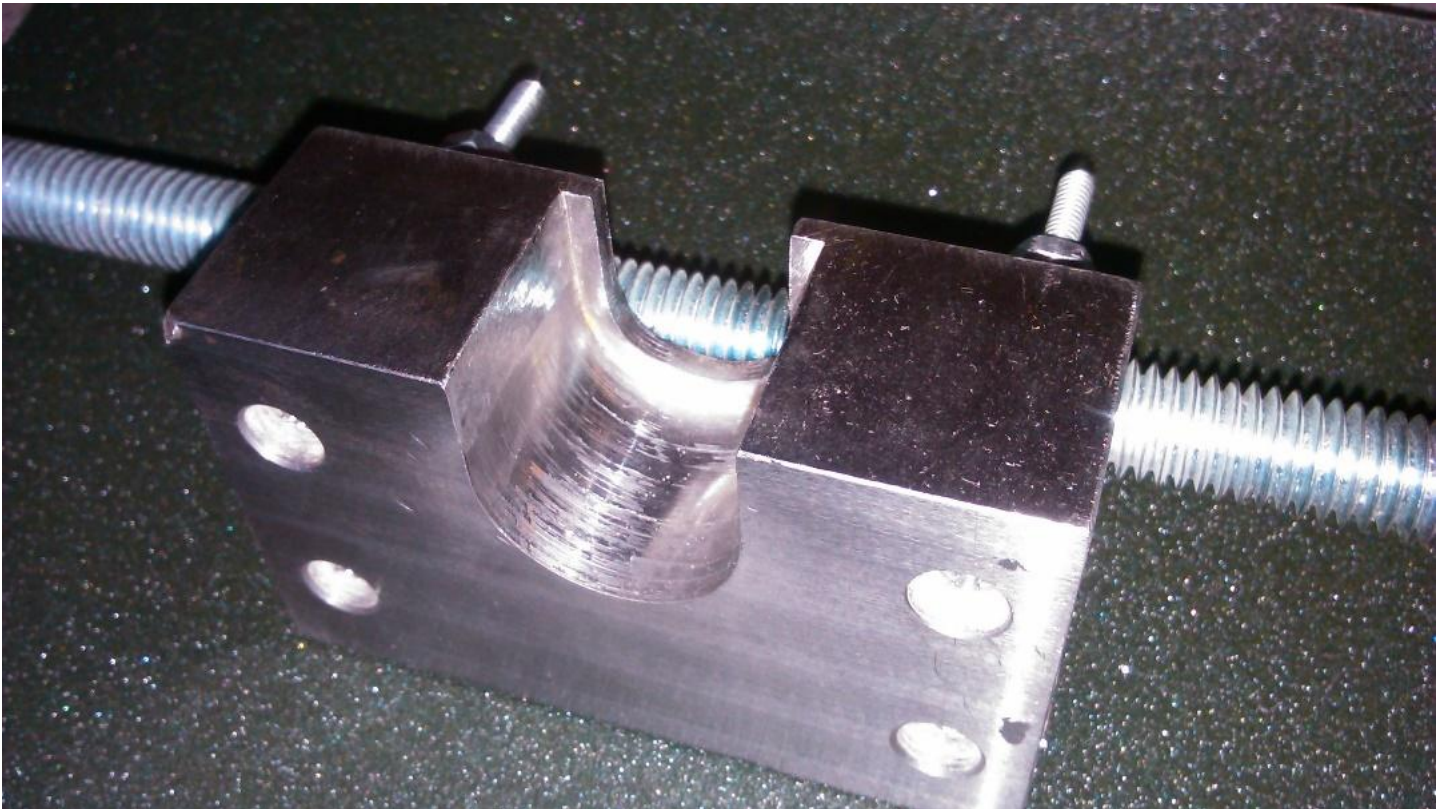
- Es recomendable hacer las uniones de la Boquilla, Venturi, Acople y el cono de suministro con las herramientas necesarias, para garantizar que no hayan pérdidas de presión por fugas entre componentes en el sistema.
- El manómetro posee un visor en cristal que requiere un cuidado especial anti golpes.
- Hacer una buena sujeción del conjunto brinda seguridad a la hora de manipular las válvulas de paso de material erosivo.
- Es recomendable limpiar con aire seco, aunque está compuesto por partes en acero inoxidable es preferible alejarlo de cualquier caso de humedad.
- Tener precaución al apretar con llaves de tubo los componentes, para evitar los daños superficiales en el acero.

MANUAL DE USO



4.3 Área de erosión

PORTA-PROBETAS



OBSERVACIONES

- El aseo de las cavidades estrechas en el porta-probetas es una parte primordial para el mantenimiento y buen uso de la máquina, ya que esta pieza por su geometría, posee partes críticas de acumulación de material desgastante.
- Es recomendable verificar la correcta sujeción del porta-probetas con la varilla de sostenimiento ya que de ello depende el ángulo de impacto en la probeta a ensayar.
- Una vez apretado el sistema de porta-probetas no hay necesidad de soltarlo hasta acabar la totalidad de las pruebas.

MANUAL DE USO



ÁREA DE EROSIÓN



CARACTERÍSTICAS		OBSERVACIONES
Material estructura	Acero	<ul style="list-style-type: none">• Posee una estructura robusta, pero los vidrios son partes delicadas en la construcción de la misma.• Un correcto aseo y mantenimiento de las partes brindan un estado de durabilidad en las partes.• La sujeción con la estructura se hace con tornillería, es vital asegurar de buena forma las partes• Una vez terminados los ensayos, se debe limpiar con una brocha, un chorro de aire y por ultimo un trozo de tela limpio.
Material Laterales	Vidrio	
Conexión a estructura	Tornillo estrella	
Dimensiones	Plano anexo	

MANUAL DE USO



ESTRUCTURA



CARACTERISTICAS		OBSRVACIONES
Material	Acero	<ul style="list-style-type: none">• Es recomendable conservar en una superficie plana.• Una vez se escoja el lugar donde se va a trabajar, no es recomendable realizar traslados excesivos del tribómetro.• Guardar los implementos de la máquina en la bodega.
Dimensiones	Plano anexo	