


UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO		
Nº DE RADICACIÓN: _____		
INFORMACIÓN EJECUTORES		
Ejecutor 1		
Nombre (s):	IVONNE MARCELA	
Apellido (s):	GUALTERO CARTAGENA	
Código:	20141375103	
E-mail:	igualteroc@hotmail.com	
Teléfono fijo:	7176682	
Celular:	3212741019	
INFORMACIÓN DEL PROYECTO		
Título del Proyecto:	ESTUDIO COMPARATIVO DE RESISTENCIA AL DESGASTE ABRASIVO, EROSIVO Y ADHESIVO EN ACEROS INOXIDABLES AISI 304 Y 420.	
Duración (estimada):	4 meses	
Tipo de Proyecto: (Marqué con una "x")	Innovación y Desarrollo Tecnológico	<input checked="" type="checkbox"/>
	Prestación y Servicios Tecnológicos	<input type="checkbox"/>
	Otro	<input type="checkbox"/>
Modalidad del Trabajo de Grado:	Investigación y proyecto de grado	
Línea de Investigación de la Facultad*:	Desarrollo tecnológico local e institucional	
Línea de Investigación del Proyecto Curricular**:	Materiales y procesos de manufactura	
Grupo de Investigación:	DisIng, área Tribología y análisis de falla	
Proyecto de Investigación:		
Áreas del conocimiento que involucra:	Ciencias básicas, procesos de fabricación, ciencia de los materiales.	
INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA		
Director: (Vo. Bo.)	Ing. Esp. MSc. Jonny Ricardo Dueñas Rojas	
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)		
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.)		

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
3. JUSTIFICACIÓN.....	12
4. OBJETIVOS.....	13
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
5. MARCO TEÓRICO.....	14
5.1 Tribología.....	14
5.2 Desgaste abrasivo.....	17
5.3 Desgaste erosivo.....	18
5.4 Desgaste adhesivo.....	20
5.5 Ensayo microscopia por barrido (SEM).....	21
5.6 Norma ASTM G65 parámetros y procedimiento para el ensayo.....	21
5.7 Norma ASTM G76 parámetros y procedimiento para el ensayo.....	21
5.8 Norma ASTM G99 parámetros y procedimiento para el ensayo.....	22
6. METODOLOGÍA.....	24
6.1 Fase de documentación.....	24
6.2 Fase de diseño experimental.....	24
6.3 Fase de fabricación de probetas.....	25
6.4 Fase de ensayos.....	25
6.5 Fase de análisis de datos.....	25
6.6 Fase de elaboración del documento tesis.....	25
7. CRONOGRAMA.....	26
8. PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN.....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de desgaste abrasivo en el deslizamiento.....	18
Figura 2. Diferentes formas de actuación de partículas erosivas.....	19
Figura 3. Erosión de una superficie según el ángulo de impacto.....	20
Figura 4. Esquema de dos asperezas en contacto; adhesión entre dos asperezas, y formación de una partícula de desgaste.....	20

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El desgaste es una problemática global que genera impacto tanto tecnológico como económico en la industria, debido a que causa pérdida de material, por consiguiente, grandes pérdidas de energía en los diversos sistemas que implican movimiento, ocasionando falla y posterior reemplazo de las partes o componentes de manera frecuente, lo que conlleva a un mayor costo de mantenimiento y procesos productivos.

Este fenómeno tribológico está relacionado con el uso, se da por la exposición ambiental y sometimiento de un material antes, durante y después de los procesamientos de materiales que emplean métodos de manufactura como los de maquinado, acabado, formado y moldeado entre otros.

De ahí que, la creciente importancia de este fenómeno ha llevado a que la ingeniería y la industria lo consideren un aspecto significativo e influyente en los procesos y operaciones de manufactura, también para la vida útil de los productos, puesto que afecta diferentes sectores de la industria.

En el entorno mundial, el tema de tribología y la problemática del desgaste es abordado por pocas entidades y/o instituciones, que investigan, plantean y optimizan opciones de solución para minimizar su efecto, a causa del alto costo de los equipos que se utilizan para la ejecución de ensayos que simulen las condiciones de trabajo. Las entidades más destacadas son ASM International (American Society for Metals), la ASTM International (American Society for Testing and Materials) entre otras.

En el entorno Nacional, son escasas las entidades que realizan estas actividades, debido a que los recursos económicos destinados como apoyo para estos estudios e investigaciones son mínimos. Como entidad líder esta ASCOR (Asociación Colombiana de Corrosión y Protección), y como institución, los grupos de investigación de universidades.

En el entorno Local, son las universidades en su gran mayoría las que se han interesado por abordar el tema, han adquirido los equipos construidos por los estudiantes como modalidad de grado para hacer los ensayos correspondientes con propósitos de aportar más ideas para mitigar, prevenir y combatir la problemática del desgaste.

Actualmente en la Universidad Distrital, el Programa de Ingeniería Mecánica cuenta con el grupo de investigación llamado DisIng, área Tribología y

análisis de falla, que estudia, investiga y analiza a cerca de este fenómeno con la finalidad de plantear y desarrollar alternativas de solución. Aunque la universidad no tiene aún todos los equipos necesarios para analizar el comportamiento de los materiales expuestos a diferentes condiciones de trabajo, si posee algunos equipos para realizar ensayos de los tipos de desgaste más comunes, que permite conocer e identificar las causas que provocan estos desgastes, para contribuir al mejoramiento de los procesos productivos al igual que al sector industrial.

En cuanto al desgaste, este ocurre dependiendo del medio, la naturaleza de interacción y la interacción con el medio circundante en el que se encuentre el material. Se manifiesta de diferentes maneras y existen varios tipos de desgaste como el abrasivo, el erosivo, el adhesivo entre otros. Teniendo en cuenta esto, se han realizado estudios en un material analizando un tipo de desgaste como el abrasivo, el erosivo, el adhesivo, abrasivo-erosivo, erosivo-adhesivo. En dos materiales, desgaste abrasivo, y desgaste adhesivo. En tres materiales, desgaste erosivo.

Por lo tanto, el presente proyecto se centra en realizar un estudio comparativo de resistencia a tres tipos de desgaste denominados, abrasivo, erosivo y adhesivo, en acero inoxidable AISI 304 y acero inoxidable AISI 420 templado y revenido, ya que a nivel local no se cuenta con un estudio de estos fenómenos tribológicos con estos aceros como materiales, por ende, no hay información que sirva de referencia ante una selección de material que vaya a estar expuesto a estas tres clases de desgaste.

Para tal fin, las pruebas de desgaste abrasivo, erosivo, y adhesivo se realizarán en los tribómetros respectivos que están en la universidad de acuerdo a los parámetros para hacer estas pruebas establecidos en las normas ASTM G65, G76 y G99 respectivamente.

DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

Teniendo en cuenta la gran importancia de la influencia de abrasivos a los que están expuestos los materiales, maquinas, equipos, estructuras, etc., no se utilizará para el ensayo de desgaste abrasivo arena Ottawa como la empleada en la norma ASTM G65, sino abrasivo (arena) nacional de tipo local.

Adicionalmente, para determinar la pérdida de masa en relación con la masa de partícula usada en la prueba de desgaste erosivo no se hará como el método estipulado en el procedimiento de prueba de la norma ASTM G76 debido a que la máquina que se utilizará para esta prueba no cuenta con el dispositivo para medir la masa de partícula erosiva. Por tanto, la pérdida de masa se estimará aproximadamente en relación a valores de magnitudes como caudal, presión entre otras. Es decir, las normas ASTM mencionadas, se usarán como referencia, de ahí que, los ensayos que se realizarán pueden presentar desviaciones con relación a los parámetros establecidos por estas normas ASTM G65 y ASTM G76 para el método de pruebas.

2. ESTADO DEL ARTE

Aquí se exponen algunos casos de estudio obtenidos de fuentes de información como papers, artículos especializados, tesis, proyectos de grado entre otras; las cuales no solo permiten conocer el origen, estado actual, evolución y tendencias relacionadas con el fenómeno y su problemática, sino que también sirven de punto de partida al desarrollo del presente proyecto.

Para comenzar se revisa el resumen del proyecto dirigido por el Dr. José Lucioni (2015) realizado en la Universidad Tecnológica Nacional, denominado *“Caracterización Tribológica mediante desgaste abrasivo-erosivo de aceros inoxidables de uso industrial tratados térmicamente e irradiados con flujo de neutrones/iones pesados”*¹, que plantea la caracterización del comportamiento tribológico de aceros austeníticos (304 y 316) y martensíticos (420) bajo los efectos del desgaste abrasivo y erosivo. También propone evaluar la influencia de la irradiación en la resistencia a la abrasión y erosión en esos mismos aceros. Todo lo anterior, por medio de varias técnicas simultáneas (erosión+abrasión+irradiación+simulación). Otros aspectos a investigar son el desgaste en función de temperaturas superiores e inferiores a la temperatura ambiente como también el efecto erosivo-abrasivo combinado.

Pretenden construir los tribómetros en base a las normas ASTM G65 (Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus) y ASTM G76 (Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets), para poder llevar a cabo las pruebas de desgaste erosivo y abrasivo.

Por otra parte, Aldo Jair Barra Obando y César Cruz Liconá (2014), Universidad Veracruzana en la investigación *“Caracterización del daño por erosión en Acero AISI 420 causado por partículas de carburo de silicio”*² proponen un análisis del comportamiento y resistencia del acero inoxidable martensítico 420 ante el desgaste por erosión. Además, el estudio del

¹ LUCIONI, José. Caracterización Tribológica mediante desgaste abrasivo-erosivo de aceros inoxidables de uso industrial tratados térmicamente e irradiados con flujo de neutrones/iones pesados. Argentina. Universidad Tecnológica Nacional. 2015.

² BARRA Obando, Aldo Jair & CRUZ Liconá, César. Caracterización del daño por erosión en Acero AISI 420 causado por partículas de carburo de silicio. México. Universidad Veracruzana. 2014. 67 p.

desempeño del carburo de silicio como material abrasivo, ejecución de pruebas sobre el acero de bajo carbono AISI 1020, esto es porque el equipo es “nuevo” (debido a un rediseño que se realizó recientemente) y según los parámetros de la norma ASTM G76-95 así lo sugiere para obtener el valor de erosión de un material como referencia, en ese caso, la norma indica que ese material es el acero AISI 1020. Esta investigación estuvo fundamentada en tres capítulos así: el primero y segundo, en el marco de un estudio de carácter cualitativo, transversal y descriptivo. El tercero, muestra las conclusiones y proposiciones generales del tema, obtenidas en los ensayos de acuerdo con las hipótesis planteadas en el trabajo.

La metodología utilizada para esta investigación se basó en los siguientes aspectos: 1) *Técnicas de caracterización* de materiales como ensayos de dureza (Vickers o Microvickers, Rockwell, y Knoop), microscopia de Fuerza Atómica (AFM, por sus siglas en inglés), microscopia electrónica de barrido SEM, espectroscopia de rayos x de energía dispersa EDS. 2) *Pruebas tribológicas* basadas en primer lugar en selección de materiales a) acero inoxidable martensítico 420 en estado de recocido. Los especímenes de este material en forma rectangular con dimensiones de 50 mm x 25 mm y 3 mm de espesor y con carga de 100 mN aplicada en diferentes zonas de la *superficie*, y b) la partícula abrasiva usada para realizar las pruebas de erosión, la cual fue carburo de Silicio (SiC) con una forma angular. En segundo lugar, el procedimiento experimental, en el cual se ejecutó la prueba de erosión a los especímenes del material seleccionado con ángulos de impacto de 30°, 45°, 60° y 90°, en un equipo similar al de la norma ASTM G76-95 durante un periodo de tiempo de 10 minutos, una presión de aire de 40 psi (lb/plg²), una velocidad de partícula de 20 + 2m/s y una tasa de flujo abrasivo de 63 g/min (gramos por cada minuto). Luego, análisis de distribución del tamaño de partícula, análisis de la morfología del carburo de silicio (forma de la partícula). En tercer lugar, resultados de las pruebas de erosión, para lo cual, se efectuó análisis de los mecanismos de desgaste mediante micrografías obtenidas de SEM. En cuarto lugar, estudio de rugosidades con AFM, para el cual se obtuvo un valor promedio midiendo la rugosidad en 5 zonas distintas de un área de mapeo de 5 X 5 μm² y 10 X 10 μm². 3) *Discusiones* basadas primeramente en Discusión de resultados finales para lo cual además del SEM emplearon un detector electrónico LED (para obtener imágenes de la superficie de desgaste más claras), logrando identificar mecanismos de desgaste como residuos de desgaste, acciones de arado y picado, desplazamiento de material, material aplastado sobre la superficie del material, y agujeros. Posteriormente, los resultados de volumen perdido, para lo cual obtuvieron la masa perdida utilizando una balanza

digital y la fórmula matemática establecida de acuerdo a la norma seguida. Aquí se muestran tablas de masa perdida promedio, de volumen perdido promedio y gráficos de volumen perdido vs tiempo. Por último, resultados de erosión total, los cuales se obtuvieron teniendo en cuenta el volumen perdido y la fórmula matemática establecida para determinar la tasa de erosión total de acuerdo a la norma seguida. Se muestran tablas de tasa de erosión total vs ángulo de impacto, de volumen perdido promedio y gráficos tasa de erosión total vs ángulo de impacto, grafico de tasa de erosión total.

La investigación concluye que la mayor pérdida de masa se dio cuando el acero AISI 420 fue sometido al impacto de las partículas de carburo de silicio a un ángulo de 30°, lo que permitió concluir que el comportamiento del material fue de tipo dúctil, en cuanto a mecanismos de desgaste fueron principalmente caracterizados por acciones de picado y arado, grandes agujeros (cráteres), rasguños, y ranuras rellenas con residuos de desgaste sobre la superficie.

Posteriormente, J.R. Laguna Camacho, A. Marquina Chávez, J.V. Méndez Méndez, M. Vite Torres y E.A. Gallardo Hernández (2013), en Revista ScienceDirect, en la investigación "*Solid particle erosion of AISI 304,316 and 420 stainless steels*"³ manifiestan el propósito de llevar a cabo pruebas de erosión de partículas sólidas para evaluar el comportamiento y rendimiento de tres aceros inoxidables diferentes, dos auténticos y uno martensítico, en relación a este tipo de desgaste. Esta investigación, además de su marco teórico, estuvo conformado por la sección de *Detalles experimentales* que describe las muestras en cuanto a material, y dimensiones; el *procedimiento de la prueba* que hace énfasis en cuanto al tiempo de la prueba, posición de la muestra, peso de la partícula erosiva, etc., otra sección es la de *Resultados y discusión*, en la que se analizan los valores obtenidos de la prueba de desgaste a través de imágenes tomadas del microscopio electrónico de barrido SEM, tablas y gráficas de valores registrados del ensayo; también por la Sección de *Conclusiones* que se deducen luego de realizar la prueba de desgaste y por ende, del análisis de los valores obtenidos de aspectos a evaluar como el comportamiento y rendimiento de los aceros inoxidables objeto de estudio.

Esta investigación se desarrolló en la sección de Detalles experimentales, primeramente, con la preparación de las *muestras* de los materiales a

³ LAGUNA Camacho J.R., MARQUINA Chávez A., MÉNDEZ Méndez J.V., VITE Torres M. & GALLARDO Hernández E.A. Solid particle erosion of AISI 304,316 and 420 stainless steels. New York. En Revista ScienceDirect. 2013. 8 p.

evaluar, a los cuales, se les capturo valores de dureza. Las muestras de estos materiales son en forma rectangular con dimensiones de 50 mm x 25 mm y 3 mm de espesor y con carga aplicada de 50 gf; la partícula abrasiva usada para realizar las pruebas de erosión fue carburo de Silicio (SiC) con una forma angular de 420-450 μm de tamaño. Luego, en la sección del procedimiento de la prueba, con la *ejecución de las pruebas de erosión*, para lo cual se utilizó un banco de pruebas de erosión similar al mostrado en la norma ASTM G76-95. Los materiales fueron erosionados en un período de tiempo de 10 min, aunque cada muestra se retiró cada 2 min para determinar la pérdida de masa. Los ángulos de impacto utilizados para las pruebas fueron 30°, 45°, 60° y 90°. Una velocidad de las partículas de 24 ± 2 m/s, y una tasa flujo de abrasivo de $150 \pm 0,5$ g/min. La temperatura ambiente fue entre 35°C y 40°C. Las muestras se pesaron usando una balanza analítica (con una precisión de ± 0.0001 g) antes del inicio de cada prueba y fueron removidas todas 2 min, se limpiaron mediante el uso de acetona y se pesaron de nuevo para determinar la cantidad de pérdida de masa. Las micrografías de las superficies erosionadas se obtuvieron utilizando SEM, para analizar las muestras e identificar los posibles mecanismos de desgaste. Después, en la sección de Resultados y discusión, con el *análisis* tanto de cicatrices de desgaste finales sobre los materiales ensayados como de geometrías de impacto a través de muestras (fotos), profundidad de las cicatrices de desgaste de valores capturados en las pruebas y registrados en tablas, perfiles de profundidad exhibidos en figuras donde se muestra la foto del material impactado y el trazo del perfil del mismo, caracterización de desgastes por medio de Micrografías SEM, mecanismos de desgaste en los materiales probados (arada, picaduras, escombros, cráteres, labios, ranuras, rugosidades, cavidades, largos fragmentos fracturados, deformación plástica o fractura frágil, etc.). Los *resultados* se muestran con valores de pérdida de masa de los materiales probados en tablas y graficas de esos valores de masa perdida versus tiempo, también los valores medios y las desviaciones estándar. De igual modo, se presentan graficas de la tasa de erosión en función del ángulo de impacto para todos los materiales ensayados. Por último, se utilizó microscopía de fuerza atómica (AFM) para medir la rugosidad de los materiales sometidos a prueba antes y después de las pruebas. Eso se llevó a cabo para analizar el efecto partículas abrasivas en las superficies de materiales, ya que se ven afectados en diferentes ángulos incidentes. Los valores de rugosidad se midieron en tres diferentes puntos de las cicatrices de desgaste a 30° y 90°. Los valores medios y las desviaciones estándar se presentan en Tablas. El área registrada fue de $25 \mu\text{m}^2$.

La investigación concluye en cuanto a la resistencia a la erosión en todos los ángulos de incidencia, que el acero inoxidable AISI 420 fue el mejor en comparación con los otros materiales probados. En cuanto a los mecanismos de desgaste, el AISI 420 presentó su máximo índice de erosión a los 30° mostrando comportamiento de tipo dúctil mientras que el AISI 316 y AISI 304 mostraron un comportamiento de tipo frágil pero su máxima tasa de erosión a 60°. Con respecto a la rugosidad de las superficies, concluyeron que cambió considerablemente a medida que las superficies eran afectadas por las partículas abrasivas. Superficies más ásperas se ven en el impacto normal (90°).

3. JUSTIFICACIÓN

La continua prisa de la industria por escalar con avances tecnológicos a través del diseño, construcción y comercialización ya sea de maquinaria, equipos o productos eficiente para desempeño de procesos cada día más exigentes, ha evidenciado la necesidad de emplear materiales con excelentes propiedades especificadas que sean apropiadas para las condiciones en que se espera que funcionen, para prevenir que un componente falle prematuramente con el motivo de evitar el reemplazo o reparación anticipada de partes, de garantizar una larga vida de servicio y por ende minimizar costos y pérdidas de tiempo.

Frecuentemente, el desgaste es una de las principales causas del reemplazo o reparación prematura de partes, lo que provoca grandes pérdidas de energía, eficiencia de operación y genera sobre costos de mantenimiento al igual que de los procesos productivos. De ahí que, la resistencia al desgaste es considerada un aspecto importante en la selección de materiales para las industrias química, alimentaria y de petróleo, así como en el diseño y las operaciones de manufactura.

Por lo tanto, con la realización de este proyecto se obtendrán conocimientos que aportarán información al campo de la tribología y servirán como guía tanto a nivel académico como a nivel comercial e industrial.

En cuanto a los materiales, se pretende determinar si varía la resistencia al desgaste abrasivo, erosivo y adhesivo en aceros inoxidables AISI 304 y AISI 420 en estado suministrado. También, analizar las propiedades mecánicas con respecto a la resistencia a estos desgastes, todo esto, en pro de contribuir al desarrollo de materiales en términos de desempeño mecánico y económico.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta de los aceros inoxidables AISI 304 y 420 respecto a la resistencia al desgaste abrasivo, erosivo y adhesivo según las normas ASTM G65 con rueda de caucho/chorro de arena, G76 por chorro de gas y partículas sólidas, y G99 tipo pin on disk.

4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Realizar ensayos de desgaste abrasivo, erosivo y adhesivo según las normas ASTM G65 con rueda de caucho/chorro de arena, G76 por chorro de gas y partículas sólidas, y G99 tipo pin on disk en aceros inoxidables AISI 304, y AISI 420.
- Caracterizar metalográficamente los aceros inoxidables AISI 304, y AISI 420.
- Realizar ensayos de dureza y microdureza según las normas ASTM E18 y ASTM 384.
- Determinar valores de rugosidades superficiales de los aceros evaluados, según la norma DIN EN ISO 4288.
- Relacionar las propiedades mecánicas medidas de los materiales evaluados con la resistencia al desgaste abrasivo, erosivo y adhesivo.
- Caracterizar morfológicamente la zona desgastada por medio de microscopia electrónica de barrido SEM.

5. MARCO TEORICO

Para llevar a cabo este proyecto de grado es importante tener conceptos claros respecto a los temas que abarca, por ende, se presentan definiciones, metodologías de procesos y equipos empleados en el desarrollo del proyecto.

5.1 Tribología

La tribología es la ciencia que estudia el movimiento relativo entre superficies solidas cuando entran en contacto y sus fenómenos relacionados: la fricción, el desgaste y la lubricación⁴.

El entendimiento de la tribología implica conocimientos de física, química, tecnología de materiales.

La tribología está presente prácticamente en todas las piezas en movimiento tales como: Anillos de pistones, chumaceras, embragues, engranajes o engranes, frenos, levas, rodamientos, sellos. También aplica a problemas como desgaste de equipos, mantenimiento y confiabilidad, abarcando desde la tecnología aeroespacial hasta aplicaciones domésticas.

Los fundamentos de la tribología se basan en el estudio de tres fenómenos: La *Fricción* entre dos cuerpos en movimiento, el *desgaste* como efecto natural de la fricción, y la *lubricación* como un medio para evitar el desgaste. De esos tres fenómenos inherentes, se hará énfasis teórico al de fricción y más al de desgaste⁵.

➤ Fricción

La fricción se define como la resistencia que ejerce el material al movimiento durante el deslizamiento o rodamiento que realice un cuerpo sólido sobre otro con el cual está en contacto.

⁴ ASM INTERNATIONAL, Metals handbook vol 18: Friction, lubrication and wear technology, Cleveland: ASM international, 1992.

⁵ Tribología. [Citado el 6 de mayo de 2016]. Disponible en <http://www.ecured.cu/Tribolog%C3%ADa>

Existen dos tipos principales de fricción: fricción estática y fricción dinámica. La fricción no es una propiedad que posean los materiales, sino que es una respuesta general del sistema.

A continuación, se mencionan las Leyes de rozamiento para cuerpos sólidos:

- La fuerza de rozamiento es de igual dirección y sentido contrario al movimiento del cuerpo.
- La fuerza de rozamiento es prácticamente independiente del área de la superficie de contacto.
- La fuerza de rozamiento depende de la naturaleza de los cuerpos en contacto, así como del estado en que se encuentren sus superficies.
- La fuerza de rozamiento es directamente proporcional a la fuerza normal que actúa entre las superficies de contacto.
- Para un mismo par de cuerpos, el rozamiento es mayor en el momento de arranque que cuando se inicia el movimiento.
- La fuerza de rozamiento es prácticamente independiente de la velocidad con que se desplaza un cuerpo sobre otro⁶.

En los procesos de manufactura, la fricción⁷ se genera debido al movimiento relativo y las fuerzas que siempre se presenta en herramientas, matrices y piezas de trabajo. Por otro lado, la fricción no siempre es indeseable; por ejemplo, sin fricción sería imposible laminar metales, sujetar piezas de trabajo en las maquinas o sostener brocas en los mandriles.

Existen muchas explicaciones del fenómeno de la fricción. Una teoría comúnmente aceptada es la *teoría de la adhesión*, otra teoría de la fricción es la *teoría de la abrasión*. Se han sugerido muchas otras explicaciones sobre el comportamiento de la fricción; sin embargo, para la mayoría de las aplicaciones en manufactura son más importantes los mecanismos de adhesión y abrasión.

➤ Desgaste

El desgaste es el daño de la superficie por remoción de material de una o ambas superficies sólidas en movimiento relativo. Es un proceso en el cual las capas superficiales de un sólido se rompen o se desprenden de la

⁶ AVILA Herrera, Juan Camilo. Estudio comparativo de la resistencia al desgaste adhesivo en un acero AISI/SAE 1040 con temple y revenido. Bogotá D.C. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2015, p. 10.

⁷ KALPAKJIAN S., & SCHMID S. R., Manufactura, Ingeniería y Tecnología, quinta edición, México, 2008, p. 1043.

superficie. Al igual que la fricción, el desgaste no es solamente una propiedad del material, es una respuesta general del sistema.⁸

En los procesos de manufactura, el desgaste cambia las formas de las herramientas y matrices.

Por otro lado, el desgaste puede tener un efecto benéfico. Por tanto, en condiciones controladas, el desgaste puede considerarse un tipo de proceso de aislamiento y pulido.⁹

A continuación, se describen los tipos de desgaste:

- *Desgaste Abrasivo*: pérdida de material por la interacción entre partículas sólidas o asperezas duras que son forzadas contra una superficie y se mueven a lo largo de ella.
- *Desgaste Erosivo*: se debe a las partículas abrasivas sueltas que desgastan una superficie.¹⁰
- *Desgaste Adhesivo*: también conocido como *desgaste por deslizamiento*, es el proceso por el cual se transfiere material de una a otra superficie durante su movimiento relativo.
- *Desgaste por Cavitación*: daño que ocurre en los materiales debido al crecimiento y colapso de pequeñas burbujas, que surgen debido a las variaciones de presión durante el flujo de un fluido.¹¹
- *Desgaste Corrosivo*: También conocido como *desgaste por oxidación* o *desgaste químico*, causado por las reacciones químicas o electroquímicas entre las superficies y el ambiente. Los productos corrosivos finos sobre una superficie constituyen las partículas de desgaste. Cuando la capa corrosiva se destruye o retira mediante deslizamiento o abrasión, empieza a formarse otra y se repite el proceso de remoción y formación de capas corrosivas.
- *Desgaste por fatiga*: También llamado *fatiga superficial* o *desgaste por fracturas superficiales* se produce cuando la superficie de un material se somete a cargas cíclicas (elevados esfuerzos), las cuales provocan

⁸ AVILA, Op. cit., p. 11.

⁹ KALPAKJIAN, Op. cit., p. 1046.

¹⁰ Ibid., p. 1049.

¹¹ Desgaste. [Citado el 6 de mayo de 2016] Disponible en <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>

la aparición y propagación de grietas bajo la acción repetitiva de estos; un ejemplo de esto es el contacto rotatorio en los rodamientos. En general, las partículas de desgaste se forman por *delaminación* o *picadura*. Otro tipo de desgaste por fatiga es la *fatiga térmica*. Los agrietamientos en la superficie se generan por los esfuerzos térmicos de los ciclos térmicos, por lo general, este tipo de desgaste ocurre en matrices para trabajo en caliente o para fundición a presión.¹²

- *Desgaste Fretting*: ocurre entre dos superficies en contacto (no necesariamente moviéndose tangencialmente), las cuales experimentan pequeñas oscilaciones cíclicas (del orden de 1 a 100µm). Es decir, cuando algunas vibraciones aparecen en las superficies en contacto, ocurren pequeños deslizamientos en la dirección del movimiento relativo.¹³
- *Desgaste por impacto*: es la remoción (mediante partículas que producen el impacto) de pequeñas cantidades de material de una superficie.¹⁴

➤ Lubricación

El deslizamiento entre superficies sólidas se caracteriza generalmente por un alto coeficiente de fricción y un gran desgaste debido a las propiedades específicas de las superficies. La lubricación consiste en la introducción de una capa intermedia de un material ajeno entre las superficies en movimiento. Estos materiales intermedios se denominan lubricantes y su función es disminuir la fricción y el desgaste. El término lubricante es muy general, y puede estar en cualquier estado material: líquido, sólido, gaseoso e incluso semisólido o pastoso.¹⁵

5.2 Desgaste abrasivo

Este tipo de desgaste es causado por una superficie dura, rugosa (o una superficie que contiene partículas duras, protuberantes), que se desliza sobre otra superficie. Como resultado, se producen *microvirutas* o *astillas*, dejando así muescas o raspaduras en la superficie más blanda. De hecho,

¹² KALPAKJIAN, Op. cit., p. 1049.

¹³ Desgaste. Op. cit.

¹⁴ KALPAKJIAN, Op cit., p. 1049.

¹⁵ AVILA, Op cit., p. 17.

procesos como el limado, rectificado, maquinado ultrasónico y maquinado por chorro abrasivo y chorro de agua actúan de esta manera. La diferencia es que, en estas operaciones, se controlan los parámetros del proceso a fin de producir las formas y superficies deseadas por medio del desgaste, mientras que, por lo general, el desgaste abrasivo no es intencional ni deseado.

Existen dos tipos básicos de desgaste abrasivo. En el *desgaste de dos cuerpos*, la acción abrasiva ocurre entre dos superficies de deslizamiento o una partícula dura, abrasiva, en contacto con un cuerpo sólido. Este tipo es la base del desgaste *erosivo*. En el *desgaste de tres cuerpos*, una partícula abrasiva se encuentra entre dos cuerpos sólidos deslizantes, como una partícula de desgaste transportada por un lubricante.

Se ha descubierto que la *resistencia al desgaste abrasivo* de los metales puros y los cerámicos es directamente proporcional a su dureza. Por lo tanto, el desgaste abrasivo se puede disminuir aumentando la dureza de los materiales (en general, mediante tratamiento térmico) o reduciendo la carga normal. Los mejores ejemplos son los neumáticos para automóviles, que duran mucho tiempo, aunque se utilicen sobre las superficies de las carreteras, que suelen ser rugosas y abrasivas. Ni siquiera los aceros endurecidos durarían tanto en dichas condiciones.¹⁶

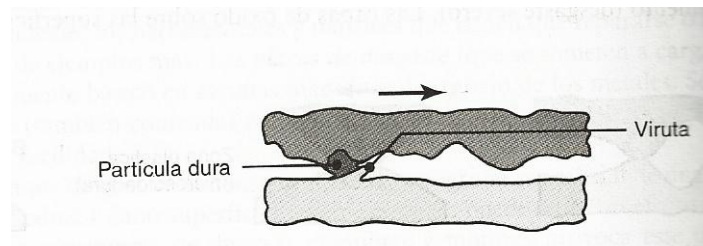


Figura 1. Esquema de desgaste abrasivo en el deslizamiento.¹⁷

Las raspaduras longitudinales en una superficie generalmente indican desgaste abrasivo.

5.3 Desgaste erosivo

El desgaste erosivo se presenta en la superficie de los cuerpos, resultado del impacto de partículas sólidas, líquidas o gaseosas que los impactan. Estas partículas pueden actuar solas o de manera combinada, impactan las superficies a diferentes velocidades y ángulos de incidencia, donde el

¹⁶ KALPAKJIAN S, Op cit., p 1048.

¹⁷ Ibid., p. 1048.

desgaste se da a través de diferentes mecanismos. La erosión afecta muchos materiales de ingeniería, especialmente elementos que componen maquinaria usada en la industria minera y en general toda pieza que sea impactada por cualquier tipo de partícula. Las partículas que causan el desgaste erosivo pueden estar en ambientes secos o húmedos pudiendo actuar en forma muy variadas tal como se muestra en la figura 2. Cuando el medio de trabajo es húmedo (por ejemplo, un medio con agua y partículas de arena), la erosión y la corrosión son fenómenos que actúan en forma sinérgica, provocando la degradación acelerada de los materiales. Para el estudio del desgaste de piezas en general, se han propuesto en los últimos años varios modelos teóricos. En estos modelos se intentan comprender los mecanismos de remoción de material y las variables involucradas.¹⁸

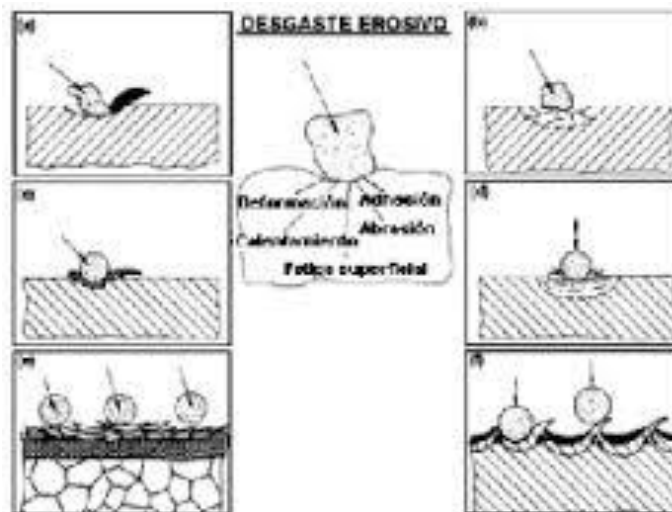


Figura 2. Diferentes formas de actuación de partículas erosivas en la formación de: (a) micro corte y micro-arado, (b) Agrietado superficial, (c) Desplazamiento de material al borde de los cráteres de impacto (d) grietas por fatiga superficial y sub-superficiales causadas por los múltiples impactos (e) Formación de pequeñas hojuelas debido a la extrusión y forjado en los impactos y (f) Formación de pequeñas hojuelas por procesos de extrusión inversos.¹⁹

En la figura 3 son presentados esquemas que muestran la forma como partículas erosivas actúan en una superficie en dependencia del ángulo de incidencia. Para erosión en ángulos cercanos a 90°, la energía de la partícula es consumida durante la deformación de la superficie y para ángulos

¹⁸ Desgaste. [Citado el 6 de mayo de 2016] Disponible en <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>

¹⁹ Ibid., <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>

menores, esa energía es utilizada en deformar y cortar el material de la superficie.

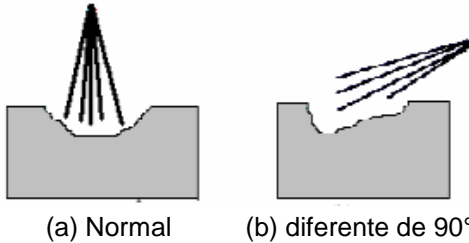


Figura 3. Erosión de una superficie según el ángulo de impacto.²⁰

5.4 Desgaste adhesivo

Si se aplica una fuerza tangencial al modelo mostrado en la figura 4, puede ocurrir cizallado (a) en la interfaz original, o (b) a lo largo de una trayectoria por abajo o por arriba de la interfaz, originando un *desgaste adhesivo*. Debido a factores como el endurecimiento por deformación en los puntos de contacto de las asperezas, difusión y solubilidad sólida mutua, con frecuencia las uniones adhesivas son más resistentes que los metales base. Por lo tanto, durante el deslizamiento, la fractura suele seguir una trayectoria en el componente más débil o más blando; se genera así un fragmento de desgaste. Aunque ese fragmento queda fijo en el componente más duro (superficie superior en la figura 4c), finalmente se desprende, al seguir frotándose en la interfaz, y se desarrolla como una *partícula de desgaste* suelta. Este proceso se conoce como desgaste adhesivo o desgaste por deslizamiento.

En los casos más severos, como los que tienen altas cargas y asperezas fuertemente unidas, el desgaste adhesivo se describe como rayado, difusión, desgarramiento, excoiación o agarrotamiento (*desgaste severo*). Las capas de óxido sobre las superficies tienen una gran influencia en el desgaste adhesivo. Pueden actuar como una película de protección, lo que produce *desgaste moderado*, que consta de pequeñas partículas de desgaste.²¹

²⁰ Ibid., Desgaste. [Citado el 6 de mayo de 2016] Disponible en <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>

²¹ KALPAKJIAN, Op. cit., p. 1047.

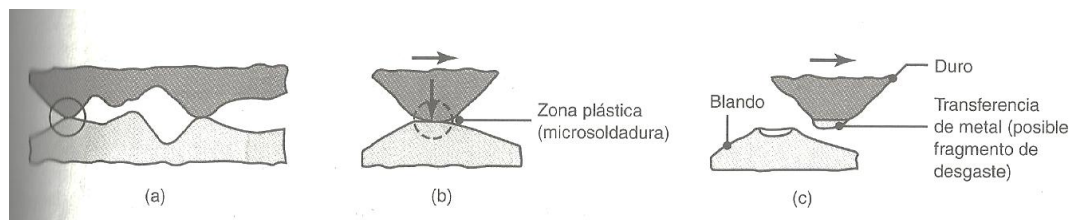


Figura 4. Esquema de (a) dos asperezas en contacto; (b) adhesión entre dos asperezas, y (c) formación de una partícula de desgaste.²²

5.5 Ensayo microscopia por barrido (SEM)

Para el estudio de superficies tribológicas este ensayo tiene la ventaja respecto al de microscopía óptica, de que se pueden visualizar las superficies con aumentos muy altos generados por el haz de electrones, por lo cual este artefacto tecnológico en la actualidad es imprescindible para la caracterización superficial en materia de estudios de desgaste.

5.6 Norma ASTM G65

La norma ASTM G65 es la encargada de estandarizar los ensayos relacionados con determinar el desgaste abrasivo de diferentes materiales. En esta norma específica algunos factores importantes del ensayo, además de explicar el procedimiento detallado de cada tipo de prueba y los métodos teóricos para el desarrollo del análisis final de los datos. De igual manera da una explicación del aparato que se va a utilizar, así como de su funcionamiento. Para el caso de este proyecto se utiliza como referencia la norma ASTM G65-04 la cual explica el uso y procedimiento del ensayo tipo Rueda de caucho/chorro de arena, para la medición del desgaste abrasivo. Esta norma tiene en cuenta los diferentes factores que se puedan presentar en la realización del estudio, como la carga aplicada, características de la máquina, velocidad y flujo de la partícula abrasiva, medio ambiente, y características del material. La norma aclara que la obtención de resultados iguales en diferentes ensayos es poco probable, debido a la gran cantidad de variables.

Detalladamente el documento explica cómo debe realizarse la prueba, como debe adecuarse el tribómetro, las características de las probetas y su geometría, y en general el procedimiento como tal.

La norma ASTM G65-04 da a conocer una serie de fórmulas y ecuaciones con las cuales se puede calcular el volumen perdido en cada probeta, después de realizado el ensayo en el tribómetro; con estos datos se logran

²² Ibid., p. 1047.

sacar conclusiones de la resistencia al desgaste abrasivo que tiene cada material.²³

5.7 Norma ASTM G76

La norma ASTM G76 es la encargada de estandarizar los ensayos relacionados con determinar el desgaste erosivo de diferentes materiales. En esta norma específica algunos factores importantes del ensayo, además de explicar el procedimiento detallado de cada tipo de prueba y los métodos teóricos para el desarrollo del análisis final de los datos. De igual manera da una explicación del aparato que se va a utilizar, así como de su funcionamiento. Para el caso de este proyecto se utiliza como referencia la norma ASTM G76-04 la cual explica el uso y procedimiento del ensayo tipo Chorro de gas y partículas sólidas, para la medición del desgaste erosivo.

Esta norma tiene en cuenta los diferentes factores que se puedan presentar en la realización del estudio, como la carga aplicada, características de la máquina, velocidad y flujo de la partícula erosiva, ángulos de impacto, medio ambiente y características del material. La norma aclara que la obtención de resultados iguales en diferentes ensayos es poco probable, debido a la gran cantidad de variables.

Detalladamente el documento explica cómo debe realizarse la prueba, como debe adecuarse el tribómetro, las características de las probetas y su geometría, y en general el procedimiento como tal.

La norma ASTM G76-04 da a conocer una serie de fórmulas y ecuaciones con las cuales se puede calcular el volumen perdido en cada probeta, después de realizado el ensayo en el tribómetro; con estos datos se logran sacar conclusiones de la resistencia al desgaste erosivo que tiene cada material.²⁴

5.8 Norma ASTM G99

La norma ASTM G99 es la encargada de estandarizar los ensayos relacionados con determinar el desgaste adhesivo de diferentes materiales. En esta norma específica algunos factores importantes del ensayo, además de explicar el procedimiento detallado de cada tipo de prueba y los métodos

²³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. ASTM G65 – 04, Pennsylvania. 12 p.

²⁴ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. ASTM G76 – 04, west Conshohocken. 6 p.

teóricos para el desarrollo del análisis final de los datos. De igual manera da una explicación del aparato que se va a utilizar, así como de su funcionamiento. Para el caso de este proyecto se utiliza como referencia la norma ASTM G99-04 la cual explica el uso y procedimiento del ensayo tipo pin on disk, para la medición del desgaste adhesivo.

Esta norma tiene en cuenta los diferentes factores que se puedan presentar en la realización del estudio, como la carga aplicada, características de la máquina, velocidad de deslizamiento, distancia de deslizamiento, medio ambiente, y características del material. La norma aclara que la obtención de resultados iguales en diferentes ensayos es poco probable, debido a la gran cantidad de variables.

Detalladamente el documento explica cómo debe realizarse la prueba, como debe adecuarse el tribómetro, las características de las probetas y su geometría, y en general el procedimiento como tal.

La norma ASTM G99-04 da a conocer una serie de fórmulas y ecuaciones con las cuales se puede calcular el volumen perdido en cada probeta, después de realizado el ensayo en el tribómetro; con estos datos se logran sacar conclusiones de la resistencia al desgaste adhesivo que tiene cada material.²⁵

²⁵ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM G99 – 04, west Conshohocken. 5 p.

6. METODOLOGIA

El presente proyecto se desarrollará siguiendo las fases y actividades que a continuación se describen:

6.1 Fase de documentación: Esta fase comprenderá la ampliación de la información encontrada en trabajos de grado, artículos, normas, libros, catálogos, fichas técnicas de equipos y materiales; con el fin de complementar la información expuesta en el estado de arte y marco teórico. Toda información documental se clasificará y sistematizará de acuerdo: a los tipos de recursos (informáticos o físicos), herramienta de búsqueda (bases de datos, catálogos de bibliotecas, etc.), temáticas (desgaste, diseño de experimentos y análisis de experimentos, ensayos, pruebas, análisis metalográfico, entre otros).

6.2 Fase de diseño experimental: En esta fase se diseña un experimento de tipo factorial para cada uno de los ensayos de desgaste con base en los parámetros de las normas ASTM G65, ASTM G76 y ASTM G99. El diseño de tipo factorial se basa en un modelo teórico que define la cantidad de pruebas y probetas necesarias para tener un resultado fiable que conduzca a un análisis y resultado concluyente de la investigación. En cada ensayo se toman tres factores de control, con dos niveles cada uno, obteniéndose 36 pruebas experimentales, para lo que se necesitarán 6 placas rectangulares²⁶ en acero inoxidable AISI 304 y 6 placas rectangulares en acero inoxidable AISI 420, 2 discos²⁷ acero inoxidable AISI 304 y 2 discos acero inoxidable AISI 420, 6 pines²⁸ en acero inoxidable AISI 304 y 6 pines en acero inoxidable 420. Las variables relacionadas en las pruebas serán pesos (cargas) y ángulos de impacto. Las cargas para la prueba de desgaste abrasivo serán de 130N según parámetros de la norma ASTM G65 y 65N, para la prueba de desgaste adhesivo serán de 10N que es la aplicada en la Norma ASTM G 99 y 5N que es una carga muy utilizada para simular procesos de pulido. Los ángulos para la prueba de desgaste erosivo serán de 90° según parámetros de la norma ASTM G76 y 60°. Para este proyecto se realizarán 3 réplicas de ensayos para obtener una mayor confiabilidad. De la misma manera se deben realizar ensayos de dureza, una microscopia óptica (metalografía) al material estándar para realizar la comparación y al

²⁶ Las placas rectangulares para las pruebas de desgaste abrasivo y erosivo.

²⁷ Los discos se les realizará el ensayo por las dos caras para favorecer el factor económico.

²⁸ Los discos y pines para la prueba de desgaste adhesivo.

final del proyecto un barrido SEM para corroborar el desgaste sufrido en la probeta.

6.3 Fase de fabricación de probetas: En esta fase se adecua el material comprado, el cual viene en forma de lingotes, placas y barras; Las placas serán de 25 por 76 por 3 mm, los discos serán de diámetro 76 mm y espesor 6 mm, los pines serán de diámetro 6 mm y longitud 10 mm. La fabricación de las probetas consistirá en cortar las formas de los materiales según las dimensiones especificadas, luego se rectificaran las superficies de las placas a 0.125 mm, de los discos y de los pines para conseguir una rugosidad aproximada de 0.8 μm . Además, se deben realizar probetas para un ensayo tipo Rockwell de dureza las cuales pueden ser discos y una probeta metalográfica que tiene la forma parecida a los pines.

6.4 Fase de ensayos: De acuerdo a lo definido, se procederá a la realización del ensayo de dureza según la norma ASTM E18, ensayo de microdureza según la norma ASTM 384, pruebas de desgaste abrasivo según la norma ASTM G65, desgaste erosivo según la norma ASTM G76 y desgaste adhesivo según la norma ASTM G99, en los respectivos equipos y tribómetros de los cuales dispone la Universidad Distrital, teniendo en cuenta las variaciones ya estipuladas. También se realizará un estudio metalográfico.

6.5 Fase de análisis de los datos: En esta fase se realizará el análisis de la información obtenida en la fase de ensayos, de modo que con esta información se lleve a cabo la comparación de resultados y así determinar en qué estado el material es más resistente al desgaste de tipo abrasivo, erosivo y adhesivo. De igual manera se obtendrán datos mediante una microscopia electrónica de barrido SEM la cual es otra de las herramientas que se usaran para el análisis morfológico del material.

6.6 Fase de elaboración del documento tesis: Esta fase corresponde a actividades de construcción del documento de tesis de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, siguiendo las normas Icontec disponibles para tal fin.

7. CRONOGRAMA

FASE	ACTIVIDAD	DURACIÓN (semanas)															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. DOCUMENTAL	1.1. Búsqueda, Clasificación y Sistematización de la información																
	1.2. Lectura y análisis de la información																
2. DISEÑO EXPERIMENTAL	2.1. Análisis información y formulación de actividades																
	2.2. Selección de diseño experimental más adecuado																
3. FABRICACION DE PROBETAS	3.1. Consultas y asesorías																
	3.2. Definición de alternativas de diseño																
	3.3. Cálculos																
	3.4. Generación de planos																
	3.5. Cotización de materiales																
	3.6. Compra de materiales																
	3.7. Fabricación de probetas																
	3.8. Aplicación de los tratamientos térmicos																
4. ENSAYOS	4.1. Ensayos desgastes abrasivo, erosivo y adhesivo																
5. ANALISIS DE DATOS	5.1. Clasificación de la información obtenida en fase de ensayos.																
	5.2. Identificación de mecanismos de pérdidas de material por medio de análisis de resultados de ensayo SEM																
	5.3. Establecimiento de la relación costo/beneficio para los materiales																
	5.4. Discusión de resultados																
	5.5. Establecimiento de conclusiones																
6. ELABORACION DEL DOCUMENTO DE TESIS	Construcción de documento final de trabajo de grado																

8. PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN

PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO		
Duración estimada en meses	4	
Semanas	16	
Descripción	Costo	Fuentes de financiación
Recurso Humano	\$ 16.974.280	Personal
1 Autor del proyecto	\$ 8.640.000	Personal
1 Director o tutor	\$ 2.368.000	Institucional
2 Asesorías varias	\$ 592.000	Institucional
Materiales y procesos	\$ 947.975	Personal
Ensayos	\$ 2.889.950	Personal
Gastos Generales	\$ 864.000	Personal
Software o equipo de apoyo	\$ 1.620.000	Personal
Subtotal	\$ 23.296.205	
5% Imprevistos	\$ 1.164.810	
TOTAL PRESUPUESTADO	\$ 24.461.015	

RECURSO HUMANO				
Descripción	Cantidad de	Dedicación Semanal	Valor Hora	Costo Persona
	Personas Numero	(Promedio) Horas	Pesos	Pesos
Autores del Proyecto	1	20	\$ 27.000	\$ 8.640.000
Director o Tutor	1	4	\$ 37.000	\$ 2.368.000
Asesorias Varias	1	1	\$ 37.000	\$ 592.000
			Subtotal	\$ 11.600.000
Carga Prestacional			46.33 %	\$ 5.374.280
			TOTAL	\$ 16.974.280

COSTO DE MATERIALES Y PROCESOS					
Materiales y Procesos	Detalle / Material	Unidad de medida	Cantidad	Valor Unitario	Total
Material Desgaste Abrasivo y Erosivo	1 AISI 304	25x1000x3 (mm)	1	\$ 12.100	\$ 12.100
	2 AISI 420	• 3 in x 0.27559 in	1	\$ 16.000	\$ 16.000
Material Desgaste Adhesivo	1 AISI 304	• 3 in x 39.3701 in	1	\$ 17.400	\$ 17.400
		• 1/4 in x 39.3701 in	1	\$ 2.700	\$ 2.700
	2 AISI 420	• 3 in x 0.7283465 in	1	\$ 40.000	\$ 40.000
		• 1 in x 4.72441 in	1	\$ 16.100	\$ 16.100
Corte de Probetas	Chorro de agua	Según trabajo	2	\$ 150.000	\$ 300.000
Maquinado	Torno	Según trabajo	1	\$ 30.000	\$ 30.000
Rectificado	Rectificadora	Horas	4	\$ 25.000	\$ 100.000
Arena para Desgaste Abrasivo	Arena local	Bulto	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Particula Solida Desgaste Erosivo	Particula erosiva	Bulto	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Servicio de Tamizado	Tamizado	Según trabajo	1	\$ 50.000	\$ 50.000
				Subtotal	\$ 824.300
Imprevistos				15%	\$ 123.645
				TOTAL	\$ 947.975

COSTO DE ENSAYOS					
Ensayos	Detalle	Unidad de medida	Cantidad	Valor Unitario	Total
Desgaste	Desgaste Abrasivo UD	Horas	24	\$ 4.000	\$ 96.000
	Desgaste Erosivo UD	Horas	24	\$ 4.000	\$ 96.000
	Desgaste Adhesivo UD	Horas	24	\$ 4.000	\$ 96.000
Masa	Balanza UD	Horas	9	\$ 80.000	\$ 720.000
Dureza	Rockwell UD	Ensayo	3	\$ 150.000	\$ 450.000
Microdureza	Vickers UD	Ensayo	3	\$ 200.000	\$ 600.000
Microscopia	Óptica (metalografía) UD	Ensayo	2	\$ 60.000	\$ 120.000
Rugosidad	Rugosímetro UD	Ensayo	3	\$ 45.000	\$ 135.000
Microscopia	Electronica de Barrido (SEM) UNAL	Ensayo	1	\$ 200.000	\$ 200.000
				Subtotal	\$ 2.513.000
Imprevistos				15%	\$ 376.950

TOTAL	\$ 2.889.950
--------------	---------------------

GASTOS GENERALES					
Generales	Detalle	Unidad de medida	Cantidad	Valor Unitario	Total
Fotocopias	Documentación Técnica	Unidad	150	\$ 50	\$ 7.500
Norma ASTM G65	Desgaste Abrasivo	Unidad	1	\$ 85.000	\$ 85.000
Norma ASTM G76	Desgaste Erosivo	Unidad	1	\$ 85.000	\$ 85.000
Norma ASTM G99	Desgaste Adhesivo	Unidad	1	\$ 85.000	\$ 85.000
Norma ASTM E18	Rockwell	Unidad	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Norma ASTM E384	Vickers	Unidad	1	\$ 135.000	\$ 135.000
Norma ASTM E986	Caracterización SEM	Unidad	1	\$ 75.000	\$ 75.000
Norma ISO 4288	Rugosidad	Unidad	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Impresión	Tesis/Toma de datos	hoja	150	\$ 250	\$ 37.500
Suministros de Oficina	Papelería	Unidad	30	\$ 2.000	\$ 60.000
Transportes	Traslados a Compra de Materiales/Laboratorios/Bibliotecas/Universidades	Pasajes	30	\$ 1.800	\$ 54.000
TOTAL					\$ 864.000

GASTOS DE HERRAMIENTAS INFORMATICAS					
Herramienta	Detalle	Costo Referencia	% Uso	Costo Uso	Total
Licencia 1	Microsoft Office 2016	\$ 200.000	60	\$ 120.000	\$ 120.000
Digitacion	Personal (Autor)	\$ 150.000	100	\$ 150.000	\$ 150.000
Computador	Marca hp (Personal)	\$ 1.000.000	100	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
Suministros de Computador	Impresora (1)/Tinta Impresora (1)/Scanner (1)/ Memoria USB (1)	\$ 300.000	100	\$ 300.000	\$ 300.000
Internet	Hogar	\$ 50.000	100	\$ 50.000	\$ 50.000
TOTAL					\$ 1.620.000

BIBLIOGRAFÍA

ASM INTERNATIONAL, Metals handbook vol 18: Friction, lubrication and wear technology, Cleveland: ASM international, 1992.

ASTM INTERNATIONAL STANDARDS WORLDWIDE, Annual Book of ASTM Standards, Metals. Easton, MD, U.S.A.: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, 1988-1991.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. ASTM G65 – 04, Pennsylvania. 12 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. ASTM G76 – 04, west Conshohocken. 6 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. ASTM G99 – 04, west Conshohocken. 5 p.

AVILA Herrera, Juan Camilo. Estudio comparativo de la resistencia al desgaste adhesivo en un acero AISI/SAE 1040 con temple y revenido. Proyecto de grado (Estudiante de Tecnología mecánica). Bogotá D.C. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad Tecnológica. Proyecto Curricular de Tecnología e Ingeniería Mecánica. 2015. 35 p.

BARRA Obando, Aldo Jair & CRUZ Licon, César. Caracterización del daño por erosión en Acero AISI 420 causado por partículas de carburo de silicio. Tesis (Para acreditar la experiencia educativa de experiencia recepcional). México. Universidad Veracruzana. Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Región Poza Rica de Hidalgo-Tuxpan. 2014. 67 p.

Desgaste. [Citado el 6 de mayo de 2016] Disponible en <http://www.utp.edu.co/~dhmesa/pdfs/desgaste.pdf>

KALPAKJIAN S., & SCHMID S. R., Manufactura, Ingeniería y Tecnología, quinta edición, México, 2008. 1295 p.

LAGUNA Camacho J.R., MARQUINA Chávez A., MÉNDEZ Méndez J.V., VITE Torres M. & GALLARDO Hernández E.A. Solid particle erosion of AISI 304,316 and 420 stainless steels. En Revista ScienceDirect .16 de enero 2013. New York.8 p. [Citado el 8 de mayo de 2016]. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164812004759>

LUCIONI, José. Caracterización Tribológica mediante desgaste abrasivo-erosivo de aceros inoxidables de uso industrial tratados térmicamente e irradiados con flujo de neutrones/iones pesados. Proyecto. Argentina 2015. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Villa María. Secretaria de Ciencia, Tecnología y Postgrado. [Citado el 8 de mayo de 2016]. Disponible en <http://cyt.frvn.utn.edu.ar/index.php/investigacion/proyectos/homologados-utn/11-utn3623>

MARTÍNEZ P. F., La tribología, ciencia y técnica para el mantenimiento, segunda edición, México, 2002.

MONTGOMERY Douglas C., Diseño y análisis de experimentos, segunda edición, México, 2013. 686 p.