

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESTADO DE ESFUERZO EN EL
DESGASTE POR CONTACTO DESLIZANTE A TRAVÉS DEL
ENSAYO BLOQUE SOBRE ANILLO (BLOCK ON RING) EN
ACEROS”**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Bachilleres:
González L. Carlos E.
Caldera C. Javier D.
Para Optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESTADO DE ESFUERZO EN EL
DESGASTE POR CONTACTO DESLIZANTE A TRAVÉS DEL
ENSAYO BLOQUE SOBRE ANILLO (BLOCK ON RING) EN
ACEROS”**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alberto Pertuz

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Bachilleres:
González L. Carlos E.
Caldera C. Javier D.
Para Optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas 2010



Caracas, 10 de noviembre de 2.010

ACTA

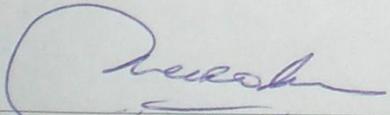
Los abajo firmantes, Miembros del Jurado Examinador designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres:

CARLOS GONZÁLEZ y JAVIER CALDERA

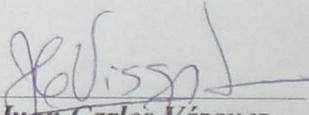
Titulado:

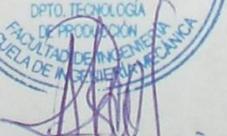
“Estudio de la Influencia del Estado de Esfuerzo en el Desgaste por Contacto Deslizante a Través del Ensayo Bloque Sobre Anillo (Block on Ring) en Aceros”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico.


Prof. **María de los A. Rodríguez**
Jurado




Prof. **Juan Carlos Vázquez**
Jurado


Prof. **Alberto Pertuz**
Tutor

DEDICATORIA

A Dios ante todo
por iluminarnos el camino desde
nuestro nacimiento.

A nuestras madres por
entregar sus vida en pro de vernos
triunfar con Dios.

A nuestra Familia
por el apoyo incondicional
brindado en todo momento.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica
y todos aquellas personas que nos brindaron
su ayuda para la realización de éste
Trabajo de Investigación.

Carlos González y Javier Caldera.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, porque en ella reside la base de todos nuestros conocimientos, fuente de crecimiento y vivencias, herramienta esencial para nuestra formación como persona e ingenieros.

A nuestros familiares, por su apoyo e incentivo ya que sin ellos no hubiésemos podido lograr ésta y muchas de las metas a lo largo de nuestras vidas.

A nuestro Profesor Guía Alberto Pertúz, por ser una pieza clave para la realización de éste trabajo de investigación.

Al Técnico Eli Araque, al Profesor Ramón Sanchez y Crisanto Villalobos por la colaboración prestada durante el transcurso del trabajo de investigación.

A nuestros compañeros de estudio y excelentes profesores por incentivarnos a seguir luchando por alcanzar nuestros objetivos y ayudarnos a adquirir nuestros conocimientos en la carrera.

A todas aquellos que sin saberlo nos dieron experiencias y oportunidades de las que aprender.

...Gracias por todo.

González L., Carlos E |y| Caldera C., Javier D

**“ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESTADO DE ESFUERZO EN EL
DESGASTE POR CONTACTO DESLIZANTE A TRAVÉS DEL
ENSAYO BLOQUE SOBRE ANILLO (BLOCK ON RING) EN
ACEROS”**

**Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2010.**

Palabras Clave: Desgaste, tribología, esfuerzo, fluencia, dureza

El proceso de desgaste en piezas utilizadas cotidianamente es un fenómeno no deseado; este puede depender de numerosas variables las cuales no son consideradas en la estimación del volumen teórico perdido utilizando la ecuación propuesta por Archard. En el presente trabajo se determinó la influencia que puedan generar esfuerzos elásticos momentáneos sobre el volumen desgastado mediante deslizamiento de pares tribológicos idénticos en los aceros AISI O1, AISI 4140 y AISI D3, cada uno de estos pares fue sometido a una magnitud de esfuerzo promedio tanto a tracción como compresión 290,5 MPa, producto de una carga externa aplicada. Como parámetro de comparación se ensayaron probetas sin la aplicación de ningún estado de esfuerzo adicional, encontrando que los estados de esfuerzo inducidos tienen influencia en el desgaste de los aceros, siendo más notoria la influencia en la aplicación de estados de esfuerzo a compresión, los cuales redujeron el volumen de desgaste en ambos materiales. De igual forma se verificó que el valor de dureza de los materiales estudiados depende de los estados de esfuerzos elásticos momentáneos que en ellos estuvo presente, estos resultados nos llevaron a desarrollar una propuesta de modificación de la ecuación de Archard, ya que esta depende directamente del número de dureza del material estudiado. Se utilizaron tres métodos para determinar el esfuerzo elástico a los cuales fueron sometidos los especímenes; 1) Galgas extensiométricas, 2) Programa Computacional basado en Elementos Finitos “ANSYS” y 3) Teorema de Castigliano, resultando ser el programa “ANSYS” en comparación con el Teorema de Castigliano la mejor aproximación a los valores reales recopilados mediante el ensayo de galgas extensométricas.

ÍNDICE GENERAL

	PP
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. Planteamiento del Problema	3
1.1 Motivación y Planteamiento del Problema	3
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo General	6
1.2.2 Objetivos Específicos	6
1.3 Alcances	7
1.4 Tema y Antecedentes	8
CAPÍTULO II. Marco Teórico	13
2.1 Tribología	13
2.2 Fricción	14
2.2.1 Fricción debido a la adhesión	17
2.2.2 Fricción debido al arado (Ploughing)	19
2.2.3 Fricción debido a la deformación	21
2.3 Lubricación	23
2.3.1 Tipos de lubricación	24
2.3.1.1 Lubricación Hidrodinámica	24
2.3.1.2 Lubricación Elastohidrodinámica	26
2.3.1.3 Lubricación límite o de presión extrema	27
2.3.1.4 Lubricación Hidrostática	28
2.3.1.5 Lubricación Sólida	29
2.4 Desgaste	30

2.4.1	Desgaste Adhesivo	31
2.4.2	Desgaste Abrasivo	34
2.4.3	Desgaste por Fatiga	35
2.4.4	Desgaste Corrosivo	36
2.4.5	Desgaste Erosivo	37
2.5	Mapa de Mecanismos de Desgaste	38
2.6	Esfuerzo	40
2.6.1	Esfuerzo Normal para vigas en flexión	42
2.6.2	Flexión elástica con cargas axiales	45
2.7	Energía de deformación elástica en flexión pura	45
2.8	Teorema de Castigliano	49
2.9	Deformación	49
2.10	Galgas Extensométricas	51
2.11	Simuladores de Análisis por Elementos Finitos	53
2.11.1	Programa de Simulación “ANSYS”	54
2.12	Microscopia Electrónica de Barrido	55
2.13	Dureza	55
2.13.1	Método de rayado para medida de dureza	56
2.13.2	Métodos de indentación estática para la medida de la dureza	57
2.13.3	Método de indentación dinámica	62
2.13.4	Efectos de la forma del indentador	62
2.14	Tensiones Residuales	63
2.14.1	Orígenes de las tensiones residuales	64
CAPÍTULO III. Metodología Experimental		65
3.1	Diagrama Experimental	65
3.2	Materiales y Métodos	66
3.2.1	Bloques	69
3.2.1.1	Mecanización del Bloque	70

3.2.2 Anillos	70
3.2.2.1 Mecanización de los Anillos	71
3.3 Ensayo de Tracción	72
3.4 Ensayo de Dureza	72
3.5 Simulación en “ANSYS” como herramienta para determinar la distribución de los estados de esfuerzos en el diseño de la probeta	76
3.6 Teorema de Castigliano como Herramienta para la Determinación de los Estados de Esfuerzo	77
3.7 Determinación de la deformación elástica asociada a los desplazamientos de las paredes del bloque	77
3.7.1 Equipo de Medición	79
3.8 Ensayo Bloque sobre Anillo	84
3.8.1 Limpieza de las Probetas	90
3.8.2 Pesaje de las Probetas	91
3.8.3 Procedimiento del ensayo Bloque sobre anillo	92
3.9 Medición del Volumen Desgastado	95
3.10 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	96
CAPÍTULO IV. Resultados y Análisis	97
4.1 Ensayo de Tracción	97
4.2 Determinación y Simulación del Estado de Esfuerzo Aplicado en el Bloque de Ensayo	98
4.2.1 Aplicación del Programa Computacional “ANSYS” para la determinación de los esfuerzos	98
4.2.2 Galgas Extensométricas	100
4.2.3 Método de Castigliano	102
4.2.3.1 Cálculo de Esfuerzo para el Bloque sometido a Tracción	102
4.2.3.2 Cálculo de Esfuerzo para el Bloque sometido a	

Compresión	114
4.3 Comparación de los métodos alternativos con el Método de Galgas	
Extensométricas	114
4.4 Variación del Esfuerzo Aplicado durante el desgaste	117
4.5 Ensayo de Dureza	119
4.6 Ensayo de Desgaste por deslizamiento sin lubricacion	124
4.6.1 Desgaste en Acero AISI O1	127
4.6.1.1 Influencia del Estado de Esfuerzo en el acero AISI O1	127
4.6.2 Desgaste en Acero AISI D3	118
4.6.2.1 Influencia del Estado de Esfuerzo en el acero AISI D3	118
4.6.3 Desgaste en Acero AISI 4140	130
4.6.3.1 Influencia del Estado de Esfuerzo en el acero AISI	
4140	130
4.6.4 Tasa de Desgaste	131
4.7 Influencia de la Dureza en el Volumen Desgastado	133
4.8 Microscopia Electrónica de Barrido	140
CONCLUSIONES	148
RECOMENDACIONES	150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
ANEXOS	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	pp.
2.1 Fuerza de Adhesión de Varios Metales Desgastados contra el Hierro en Vacío	24
2.2 Escala de Mohs de dureza de minerales	53

3.1	Composición Química para el Acero AISI 4140	66
3.2	Composición Química para el Acero AISI D3	66
3.3	Composición Química para el Acero AISI D3	67
3.4	Símbolos y Designaciones Asociadas con la Figura 3.10	75
3.5	Especificaciones de la galga	80
3.6	Coeficiente dimensional de desgaste para cada acero	85
3.7	Valores de carga y distancia recorrida para cada material	87
3.8	Tiempo de duración del ensayo para cada material	88
3.9	Variables de operación en común para los materiales utilizados	88
3.10	Variables de operación particulares entre los materiales	89
4.1	Resistencia a la fluencia	97
4.2	Esfuerzo asociado a las deformaciones producidas en el ensayo	100
4.3	Desplazamiento utilizado en el ensayo de desgaste y su esfuerzo asociado	100
4.4	Deformaciones producidas por los desplazamientos aplicados a las paredes del espécimen	101
4.5	Esfuerzos asociados a las deformaciones producidas en el espécimen	101
4.6	Diferencia porcentual entre el método de galgas extensométricas (esfuerzo de tracción) y el programa de simulación por elementos finitos “ANSYS”	115
4.7	Diferencia porcentual entre el método de galgas extensométricas (esfuerzo de compresión) y el programa de simulación por elementos finitos “ANSYS”	115
4.8	Diferencia porcentual entre el método de galgas	115

	extensométricas (esfuerzo de tracción) y el método de Castigliano	
4.9	Diferencia porcentual entre el método de galgas extensométricas (esfuerzo de compresión) y el método de Castigliano	114
4.10	Valores de dureza obtenido del bloque de acero AISI 4140 asociado a los distintos estados de esfuerzo.	120
4.11	Valores de dureza obtenido del bloque de acero AISI O1 asociado a los distintos estados de esfuerzo.	120
4.12	Valores de dureza obtenido del bloque de acero AISI D3 asociado a los distintos estados de esfuerzo.	120
4.13	Esfuerzo promedio generado en el ensayo de desgaste	124
4.14	Masa Perdida en el ensayo de desgaste de los bloques bajo distintos estados de esfuerzos	125
4.15	Parámetros de ensayo de ensayo	126
4.16	Variación del volumen de desgaste del acero AISI O1	127
4.17	Variación del volumen de desgaste del acero AISI D3	129
4.18	Variación del volumen de desgaste del acero AISI 4140	130
4.19	Tasa de Desgaste de los Aceros en Estudio	132
4.20	Constantes de los aceros	136
4.21	Coefficiente adimensional de desgaste real	137
4.22	Valor de dureza correspondiente al esfuerzo promedio aplicado en el ensayo de desgaste	138
4.23	Coefficiente dimensional de desgaste real	139
4.24	Valores del volumen desgastado real y el estimado mediante la propuesta de modificacion a la ecuacion de Archard	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	pp.
2.1 Diagrama de cuerpo libre que ilustra el deslizamiento de un cuerpo libre sobre una superficie	15
2.2 Plano inclinado usado para determinar el coeficiente estático de fricción	17
2.3 Fricción debido a la adhesión	18
2.4 Fricción debido al arado (ploughing)	20
2.5 Fricción debido a la deformación	22
2.6 Gradiente de Presiones en Lubricación Hidrodinámica	26
2.7 Lubricación Elastohidrodinámica	27
2.8 Lubricación Hidrostática	29
2.9 Desgaste adhesivo	34
2.10 Desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos	36
2.11 Desgaste por fatiga	37
2.12 Desgaste corrosivo	38
2.13 Desgaste Erosivo	38
2.14 Mapa de Mecanismos de Desgaste	41
2.15 Viga recta en flexión positiva	44
2.16 Distribución de esfuerzos para vigas en flexión	45
2.17 (a) Elemento en tensión uniaxial y (b) Diagrama hookeano esfuerzo-deformación unitaria	47
2.18 Representación de una galga extensométrica unidireccional	55
2.19 Geometría de los indentadores (a) Brinell y (b) Rockwell	60
2.20 Geometría del indentador Vickers	61
2.21 Geometría del indentador Knoop	62
3.1 Geometría del Bloque Conforme	68

3.2	Geometría del Anillo	68
3.3	Representación del Bloque de Ensayo	69
3.4	Representación del Anillo FALEX F-S10 de Ensayo	71
3.5	Geometría del Espécimen para el Ensayo de Tracción	72
3.6	Equipo para lijar	73
3.7	Equipo para pulir	73
3.8	Durómetro marca Future Tech Corp FV-70	74
3.9	Durómetro marca Buheler	74
3.10	Geometría del Indentador o Penetrador	75
3.11	Representación de la superficie inferior del bloque al cual se le midió la dureza bajo los tres estados de estudio	76
3.12	Montaje donde se realizó la medición con las galgas	79
3.13	Strain Indicator marca Vishay instruments modelo P-350A	79
3.14	Conexión de la galga al transductor para un cuarto de puente sin compensación	80
3.15	Figura de una galga unidireccional	80
3.16	Superficie de la probeta con la dirección de los ejes utilizada	83
3.17	Coefficiente de desgaste K vs estado de lubricación, mecanismo de desgaste adhesivo	84
3.18	Mapa de Mecanismos de Desgaste	87
3.19	Limpiador Ultrasónico	90
3.20	Limpieza de Bloques y Anillos	90
3.21	Balanza Analítica Scientech	92
3.22	Máquina de Ensayo FALEX Alfa LFW-1	93
3.23	Microscopio Electrónico de Barrido marca Hitachi S-2400	96
4.1	Simulación de los Estados de Esfuerzo cuando el Bloque es sometido a Tracción	99

4.2	Simulación de los Estados de Esfuerzo cuando el Bloque es sometido a compresión	99
4.3	Geometría del bloque de ensayo seccionado a la mitad	103
4.4	Diagrama de cuerpo libre de la geometría generalizada del bloque sometido a tensión, para el cálculo del esfuerzo a través del teorema de Castigliano	104
4.5	Diagrama de Cuerpo Libre de la Sección 1 en el bloque sometido a tensión	104
4.6	Diagrama de Cuerpo Libre de la Sección 2 en el bloque sometido a tensión	105
4.7	Sección transversal 1	107
4.8	Diagrama de cuerpo libre de la geometría generalizada del bloque sometido a tensión con empotramiento	110
4.9	Diagrama de cuerpo libre de la geometría generalizada del bloque sometido a tensión sin empotramiento	110
4.10	Región <i>abcd</i> en la sección transversal del empotramiento	112
4.11	Variación del esfuerzo en la región <i>abcd</i> producto del momento interno resultante en el bloque sometido a tensión	112
4.12	Distribución de Esfuerzo producto de la Fuerza V_x en la región <i>abcd</i> en el bloque sometido a tensión	113
4.13	Variación de la distribución de los esfuerzos a medida que avanza el ensayo de desgaste, cargas a tracción	119
4.14	Microscopía de la zona de desgaste	141
4.15	Fotografía a una magnificación de 100x de la muestra N°1 Estado sin carga	143
4.16	Fotografía a una magnificación de 500x de la muestra N°2 Carga a tracción	144
4.17	fotografía a una magnificación de 500x de la muestra N°3	

	Carga a compresión	144
4.18	Fotografía a una magnificación de 2000x de la muestra N°1	
	Estado sin carga. Análisis EDS	145

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Grafico		pp.
4.1	Comparación de los métodos alternativos con respecto al ensayo de galgas extensométricas, estado a tracción	116
4.2	Comparación de los métodos alternativos con respecto al ensayo de galgas extensométricas, estado a Compresión	116
4.3	Grafica de Variación del Estado de Esfuerzo en Función de la Profundidad de Desgaste	118
4.4	Representación grafica de los valores promedio de dureza para el acero 4140	121
4.5	Representación grafica de los valores promedio de dureza para el acero AISI O1	122
4.6	Representación grafica de los valores promedio de dureza para el acero AISI D3	123
4.7	Variación del Volumen de Desgaste en Función del Esfuerzo Aplicado para Bloques de Acero AISI O1	128
4.8	Variación del Volumen de Desgaste en Función del Esfuerzo Aplicado para Bloques de Acero AISI D3	129
4.9	Variación del Volumen de Desgaste en Función del Esfuerzo Aplicado para Bloques de Acero AISI 4140	131
4.10	Tasa de Desgaste de los Aceros en Estudio	133

4.11	Dureza en función de la magnitud de esfuerzo de Acero AISI 4140	134
4.12	Dureza en función de la magnitud de esfuerzo de Acero AISI O1	135
4.13	Dureza en función de la magnitud de esfuerzo de Acero AISI D3	135
4.14	Análisis espectroscópico punto 1 figura 4.18	146
4.15	Análisis espectroscópico punto 2 figura 4.18	146
4.16	Análisis espectroscópico punto 3 figura 4.18	147

INTRODUCCIÓN

Ningún elemento de máquina es inmune al desgaste; este fenómeno se manifiesta siempre que exista carga y movimiento, ya que la calidad de la mayoría de los productos metálicos depende de la condición de sus superficies y del deterioro de esta debido al uso, limitando la vida y el desempeño de los componentes de una máquina. De esta forma la tribología como ciencia fundamental en el estudio de la lubricación, fricción y desgaste se encuentra cada vez mas siendo tema central de multidisciplinarias discusiones ya que representa el eje donde la eficiencia de una producción, la reducción de gastos de mantenimiento y el aumento de la vida útil de partes en movimiento relativo, son congruentes en la búsqueda de un compromiso que genere la reducción de gastos y las mayores ganancias económicas de cualquier sector productivo.

La ecuación propuesta por Archard es la más conocida a fin de estimar la pérdida de volumen producto del desgaste adhesivo, pero la misma no es capaz de predecir la influencia del estado de esfuerzo elástico o momentáneo en la estimación final del desgaste ya que no se encuentra ningún término en dicha ecuación que represente esta variable. De esta manera se utilizó el ensayo bloque sobre anillo como herramienta experimental que nos permitió el estudio y determinación del volumen de desgaste al someter dos cuerpos a contacto deslizante, extrapolar así conclusiones obtenidas a partir de un ensayo de tipo simulativo, a sistemas en operación bajo las mismas condiciones.

Es por ello que la finalidad de la presente investigación busca estudiar la influencia de un estado de esfuerzo en el desgaste por contacto deslizante en

dos aceros comerciales AISI O1, AISI 4140 y AISI D3, cuando son ensayados pares tribológicos del mismo material. El estudio de la influencia se realizará en base a la variación de masas en pares (bloque y anillo) de geometría conforme. Los parámetros de operación serán determinados y la magnitud del estado de esfuerzo que se aplicará será calculada. El análisis comparativo por cuantificación en la variación de masa de las probetas y la variación de volumen según la ecuación de Archard, entre ambos materiales respecto a cada uno de los estados de esfuerzo (Tracción, Compresión y Neutro) será la principal fuente concluyente en el estudio de éste fenómeno. De igual forma se analizará la influencia que puedan tener dichos estados de esfuerzos en el valor de la dureza de los materiales en estudio, siendo esta variable esencial en el cálculo del volumen desgastado en la ecuación propuesta por Archard.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Motivación y Planteamiento del problema

El estudio de la Tribología surge por primera vez en Inglaterra en 1966 y es entendida como la rama de la mecánica que se encarga del estudio de superficies en contacto con movimiento relativo entre ellas, por lo que considera la interrelación de los procesos de fricción, desgaste y lubricación entre los cuerpos.

A lo largo de la historia, y principalmente durante la revolución industrial es donde se presenta la mayor iniciativa de interés en el estudio, especialmente en Gran Bretaña cuando el Ministerio de Tecnología, basándose en estudios realizados sobre la influencia del fenómeno, llegó a la conclusión que mas de mil millones de dólares anuales podían ser ahorrados si la industria Británica realizaba un correcto uso del conocimiento tribológico del momento.

Por esto la tribología presenta como principal objetivo el de elevar la vida útil de las máquinas, mediante la disminución de la fricción y el desgaste; evitando un gasto en materiales, energía y tiempo, que en términos económicos ascienden al 1% del PIB de un País desarrollado suponiendo un freno a la productividad y competitividad a las empresas manufactureras, debido a los gastos en herramientas y los tiempos muertos para el cambio de las mismas.

Según E. Rabinowicz (1995) las causas de pérdida de utilidad de los objetos materiales son: 15% por anticuado, 15% por descompostura y 70% por deterioro de superficie, siendo aquí donde nos carga el desgaste su factura. El análisis del desgaste es importante porque junto con la fatiga y a la corrosión son los problemas que más fallas causan en las máquinas. De estos tres el menos estudiado ha sido el desgaste. La predicción del desgaste es difícil porque no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de todo el tribosistema con el que interacciona el cuerpo que se desgasta. Dado que el desgaste supone un fenómeno complejo por la cantidad de variables involucradas e interrelacionadas entre sí, dificulta que la estimación tasa de desgaste presente una fórmula universalmente aceptable que involucre todas las variables de estudio, más que la generalizada por el modelo lineal básico de Archard usado para cuantificar el volumen de la pérdida de material producto del desgaste.

En este sentido, cuando se estudia la presencia de un estado de esfuerzo como una de las variables operantes dentro del proceso de desgaste, se puede notar que la influencia de este no se toma en cuenta como parámetro en el cálculo de la pérdida de volumen. Por lo general en la piezas trabajadas se pueden encontrar esfuerzos denominados esfuerzos residuales los cuales son producto de la mecanización o deformación plástica aplicada, de igual forma, se puede encontrar un estado de esfuerzo elástico momentáneo generado por la aplicación de una carga externa, ya sea sometiendo a la pieza a compresión o tensión.

En el estudio realizado por Buciumeanu y colaboradores en el año 2008, mediante un ensayo reciprocante utilizando la prueba Pin on Disk, cuya área de contacto influyente es muy poca y depende mucho de la carga aplicada, que

la aplicación de cargas sobre una pieza que produzcan un estado de esfuerzo elástico tiene una influencia substancial en el comportamiento del desgaste para la aleación de aluminio estudiada. De igual forma se llevo a concluir que la pérdida de volumen por desgaste variaba en función del tipo de estado de esfuerzo aplicado en la zona elástica, aumentando para esfuerzos de compresión y disminuyendo para esfuerzos a tensión.

Es por ello que la presente investigación propone estudiar la influencia que puedan presentar los estados de esfuerzos en el rango elástico en el desgaste por contacto deslizante, de pares tribológicos de tres tipos de aceros cuando son sometidos a ensayo Bloque sobre Anillo.

Por tal razón surge la motivación de realizar la presente investigación pues considera el aporte de importantes conocimientos y conclusiones en un área de trabajo, que si se podría decir, aún comienza a dar sus primeros pasos; permitirá abrir nuevos campos de investigación y servirá para dar base y sentido a fenómenos que aún cuesta un poco determinar su origen y comportamiento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar la influencia del estado de esfuerzo en el desgaste mediante el ensayo bloque sobre anillo en los aceros AISI O1, AISI 4140 y AISI D3.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar el bloque de tal manera que pueda ser provisto de un estado de esfuerzo constante durante la ejecución del ensayo.
- Determinar el estado de deformación experimental y el estado de esfuerzo asociado a dicha deformación.
- Determinar el desgaste en probetas sometidas a un estado de esfuerzo a compresión y en probetas sometidas a un estado de esfuerzo a tensión mediante el ensayo bloque sobre anillo.
- Cuantificar la tendencia en la pérdida de masa y volumen de los pares tribológicos ensayados en función del estado de esfuerzo aplicado.
- Comparar el desgaste para los mismos pares tribológicos de las probetas sometidas tanto a tensión como compresión, con las probetas ensayadas sin estado de esfuerzo.

- Determinar la dureza en probetas sometidas a un estado de esfuerzo a compresión y en probetas sometidas a un estado de esfuerzo a tensión.
- Evaluar la influencia de los estados de esfuerzo a tensión y compresión en la dureza del material al compararlo con el mismo sin carga aplicada.

1.3 Alcances

- Evaluación y diagnóstico del estado inicial y funcionamiento respecto a la Norma ASTM G77-98 de la máquina de ensayo Falex Block on Ring.
- Determinación de la resistencia a la fluencia y resistencia a la tracción de los aceros AISI O1, AISI 4140 y AISI D3 mediante un ensayo de tracción.
- Diseño y mecanización del block con área transversal en forma de U, en las paredes laterales del espécimen serán mecanizados dos orificios alineados con objeto de ubicar una barra roscada a través de la cual se accionara la carga necesaria para flexionar el componente.
- Determinación de la dureza sobre la superficie de contacto en la probeta sin ser ensayada de los aceros AISI O1, AISI 4140, AISI D3 mediante un ensayo de microdureza.

- Determinación del estado de deformación experimental utilizando galgas extensométricas.
- Evaluación del estado de esfuerzo asociado a dicha deformación mediante relaciones constitutivas.
- Ensayo de prueba para verificar el funcionamiento del equipo y su adecuación al nuevo diseño de la probeta mecanizada.
- Ensayar cada uno de los pares tribológicos con su respectivo estado de esfuerzo para los aceros en estudio.

1.4 Antecedentes

En el año 1994, S. Spuzic, K. N. Strafford, C. Subramanian y L. Green en su trabajo titulado “INFLUENCE OF STRESS STATE ON ABRASIVE WEAR OF STEELS” siguiendo la analogía con la corrosión por esfuerzo y fatiga, así como con el debilitamiento cíclico del acero, estudiaron la posible influencia de la magnitud de los estados de esfuerzo y los esfuerzos residuales en el desgaste abrasivo. En tal sentido, trabajaron con especímenes de acero hipoeutectoide doblados para obtener esfuerzos de tensión o compresión, los cuales posteriormente fueron sometidos a un rozamiento recíprocante en la zona de dobles con cargas normales de 25 a 40 N. Lo que finalmente les permitió concluir que la profundidad de los surcos y el mecanismo de desgaste difieren dependiendo si los especímenes están bajo tensión o compresión. Esfuerzos de tensión favorecieron el micro-cutting, mientras que el estado de compresión aparentemente mantuvo el micro-ploughing. Por tanto, los

experimentos piloto que llevaron a cabo con acero hipereutectoide, indicaron (con 80% de confianza) la influencia significativa de los esfuerzos cíclicos en el desgaste abrasivo. Posteriormente, en análisis realizados y combinando resultados de observaciones por microscopios de barrido electrónico es que se ha permitido discutir y explicar el fenómeno.

Seguidamente, en el año 2003 Francesco Toschi, Cesare Melandri, Paola Pinasco, Edoardo Roncari, Stefano Guicciardi, y Goffredo de Portu, en su trabajo titulado “INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON THE WEAR BEHAVIOR OF ALUMINA/ALUMINA-ZIRCONIA LAMINATED COMPOSITES” evaluaron el comportamiento tribológico de compuestos cerámicos laminados producidos por superposición alternando capas de Al_2O_3 y $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$. Estos compuestos fueron diseñados para tener una superficie de alúmina en cada lado. Esta configuración causa esfuerzos residuales de compresión que son inducidos en la superficie debido a la diferencia de coeficientes de expansión térmica de las distintas capas, que conduce a un aparente aumento de la dureza superficial. La cantidad de esfuerzos residuales fue determinada usando la técnica de indentación, y el comportamiento tribológico de esas estructuras laminares fue evaluado usando el método pin-on-disk para diferentes cargas y velocidades de deslizamiento. Comparaciones con los resultados obtenidos de alúmina libre de esfuerzo muestran que, dentro del rango de esas condiciones experimentales, la mejora de la tenacidad de la superficie conduce a una reducción del coeficiente de fricción e incrementa la resistencia al desgaste de los componentes.

En el año 2007 Mitchell Andrew y Shrotriya Pranav en su trabajo “ONSET OF NANOSCALE WEAR OF METALLIC IMPLANT

MATERIALS: INFLUENCE OF SURFACE RESIDUAL STRESSES AND CONTACT LOADS” investigaron la respuesta al desgaste en nanoescala de una aleación de Cobalto-Cromo (ASTM F-75), como una función de la carga de contacto y el esfuerzo residual superficial, con el fin de identificar el mecanismo que gobierna el inicio del daño superficial en implantes modulares. Una configuración única fue utilizada para aplicar el rango de esfuerzos planos conocidos a la superficie del espécimen, en aras de simular diferentes niveles de esfuerzos residuales. Usando la punta de un microscopio explorador de fuerza, así como también una buena caracterización de “aspereza”, fueron aplicadas fuerzas de contacto controladas en el espécimen para simular mecánicamente la carga superficial. El volumen del material removido fue medido para caracterizar la tasa de desgaste como función de la carga de contacto y el estado de esfuerzo superficial. Mediciones experimentales del material removido indican que un nivel crítico de presión de contacto es requerido para iniciar el desgaste de la superficie de cobalto-cromo y se espera que presiones de contacto mayores aceleren el proceso de desgaste. A presiones de contacto constante, se encontró que la tasa de desgaste fue acelerada para esfuerzos planos de compresión mientras que esfuerzos planos de tensión tendió a disminuir la superficie de desgaste. Un mecanismo de desgaste superficial basado en el sucesivo daño/delaminación de la cubierta de óxido superficial debido al contacto de aspereza sencilla y la repasivación de la superficie expuesta, fue propuesto para explicar las observaciones experimentales.

Haciendo referencia en el trabajo anterior M. Buciumeanu, I. Crudu, L. Palaghian, A.S. Miranda, F.S. Silva. En su trabajo titulado “INFLUENCE OF AN ADDITIONAL ELASTIC STRESS ON DRY WEAR BEHAVIOUR IN RECIPROCATING TEST” evaluaron experimentalmente la influencia de la acumulación de los estados de esfuerzo, producidos por una carga externa, en el

desgaste seco recíprocante. Los resultados obtenidos de ensayos de desgaste seco recíprocante fueron basados en ensayos de una aleación Al7175, en contacto con un pin de acero 34CrNiMo6. Así pudieron demostrar que las magnitudes de esfuerzos elásticos aplicados tienen una influencia substancial en el comportamiento del desgaste de los materiales usados en este estudio. Lo que fue considerado para la evaluación del desgaste y les permitió construir y proponer un modelo modificado de Archard para predecir el volumen de desgaste, tomando en cuenta la acumulación de esfuerzos elásticos producidos por cargas externas.

En el año 2010 Moros P. Hernán y Ruiz S. Heli M. en su trabajo titulado “ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ESTADO DE ESFUERZO EN EL DESGASTE POR DESLIZAMIENTO SIN LUBRICACIÓN, A TRAVÉS DEL ENSAYO BLOQUE SOBRE ANILLO EN ACEROS” demostraron que los estados de esfuerzo de tracción y también de compresión inducidos por cargas externas tienen influencia en el desgaste de los aceros, siendo más notoria la influencia en la aplicación de estados de esfuerzo a compresión, los cuales redujeron el volumen de desgaste en ambos materiales.

Higashimita, Tama-ku, Kawasakie en Julio del año 2002 en su trabajo titulado “INFLUENCE OF RESIDUAL STRESSES ON THE HARDNESS NUMBER IN THE AFFECTED LAYER PRODUCED BY SHOT PEENING” evaluaron experimentalmente la influencia de los esfuerzos residuales en la micro dureza (vickers) en un acero de carbono medio (C: 0.45), para ello aplicaron el proceso de Granallado y doblado de lamina. En este estudio lograron demostrar que el número de dureza incrementa en el campo de esfuerzo elástico de compresión inducida por el proceso de Granallado, también que la influencia de los

esfuerzos residuales de compresión inducida por el proceso de Granallado en el numero de dureza es similar al producido en el caso que se aplica el proceso de doblado de lamina, en este caso el incremento de dureza máximo fue de 13 HV. En el proceso de doblado demostraron que cuando el material en estudio se somete a un campo de esfuerzo de tracción en la zona elástica la dureza disminuye con el aumento de este esfuerzo, el incremento de dureza máximo de este caso fue de 5 HV. Encontraron también que al variar la magnitud del estado de esfuerzo tanto en tracción como en compresión en el régimen elástico, la dureza varia de manera lineal.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Tribología

La palabra Tribología deriva de la palabra griega “tribos” que significa roce o deslizamiento y por tanto, la concepción académica más aceptada la define como la Ciencia y Tecnología de la interacción de las superficies con movimientos relativos y las prácticas relativos a ellos.

La Tribología es un nuevo campo de la ciencia la cual está enfocada en la fricción, el desgaste y la lubricación de superficies en interacción en movimiento relativo. Su origen (Tribology & Lubrication Technology, March 2006, pp. 24-28) data de 1960 cuando en el Reino Unido se reportaron aumentos considerable de fallas, algunas con altas pérdidas financieras e incluso mejorando la tecnología del momento las averías se hacían presente. Esta tendencia fue reconocida por especialistas en fricción, desgaste y lubricación; sin embargo, no fue hasta octubre de 1964 cuando fue revelada la magnitud del problema y su ocurrencia a escala internacional. En este sentido, una investigación comienza y como resultado la representación del Gobierno Británico fue hecha con la creación de un Grupo de Trabajo por parte del Excmo. Señor Bowden de Chesterfield. Así, el nacimiento de ésta ciencia se remonta al 9 de marzo de 1966, cuando el Gobierno Inglés publicó el informe del Grupo de Trabajo representado por Peter Jost que confirmó el efecto directo entre la educación de la tribología en el Reino Unido y el progreso en el desarrollo y eficiencia de la industria; tanto así, que fue estimado un ahorro potencial de 515 millones de Libras Esterlinas por año (en términos de 1966) en

el sector industrial si se hacía una mejor aplicación de los principios y prácticas tribológicas. Posteriormente, el término es definido en 1967 por el comité de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

Los problemas de tribología como influencia en el aspecto económico son de gran importancia en la ingeniería. Ya muchas naciones a nivel mundial han evidenciado desde 1966 que el estudio mejora, y la aplicación de aspectos tribológicos en cualquier aspecto industrial o productivo representa enormes ahorros, estimando cifras de miles de millones de dólares. Es por ello que la mayoría de estos estudios se han enfocado en minimizar las pérdidas causadas por la fricción y el desgaste entre cuerpos en movimiento relativo.

La tribología se centra en el estudio de tres fenómenos: (Stachowiak y Batchelor, 2005) El desgaste como la mayor causa de desperdicio de material y pérdida del rendimiento mecánico, la fricción como la principal causa de desgaste y disipación de energía, y la lubricación, como un medio efectivo para controlar el desgaste y reducir la fricción. Por lo tanto, la tribología es un campo de la ciencia el cual aplica un análisis operacional a problemas de gran importancia económica como la fiabilidad, el mantenimiento y el desgaste de equipos. Muchas veces la aproximación de la solución de un problema, en el campo multidisciplinario de la tribología, a menudo presenta muchas opciones que pueden incluir diversas áreas de estudio como el diseño y contacto mecánico, la lubricación, la dinámica de fluidos, la química de la superficie y la ciencia e ingeniería de los materiales.

2.2 Fricción

La fricción se define como la resistencia al movimiento que es experimentada durante el deslizamiento, cuando un cuerpo se mueve tangencialmente sobre otro con el cual está en contacto. La fuerza tangencial resistiva, la cual actúa en una dirección directamente opuesta a la dirección del movimiento, es llamada fuerza de fricción F .

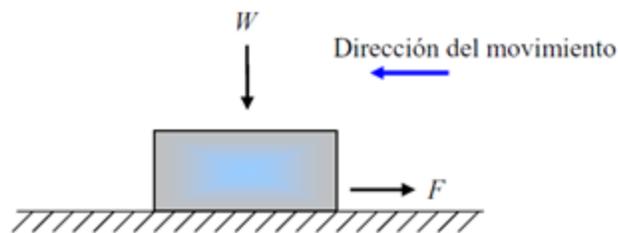


Figura 2.1 Diagrama de cuerpo libre que ilustra el deslizamiento de un cuerpo libre sobre una superficie.

Si dos cuerpos se colocan en contacto, el valor de la fuerza tangencial que es requerido para iniciar el movimiento es la fuerza de fricción estática F_s . La fuerza tangencial requerida para mantener el movimiento relativo es conocida como la fuerza de fricción cinética, la fricción no es una propiedad del material, es una respuesta del sistema.

Las leyes que rigen la fricción suelen ser muy simples y fueron formuladas por Coulomb en 1875, (la mayoría de sus trabajos fueron basados en estudios previos realizados por Leonardo da Vinci, Amontons y Euler), las leyes pueden ser mencionadas en términos muy generales:

- La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
- La fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada.
- La fuerza de fricción es independiente del área de contacto.
- La fricción estática puede ser mayor que la fricción cinética (dinámica).

Es importante señalar que esas “leyes” son de carácter muy general y mientras son aplicables en muchas circunstancias, existen numerosas condiciones bajo las cuales no se cumplen.

La fricción es comúnmente representada por el coeficiente de fricción, para el cual generalmente se usan los símbolos μ o f . El coeficiente de fricción es cociente entre la fuerza de fricción, F , y la carga, N :

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

El coeficiente de fricción típicamente oscila de 0,03 para un cojinete muy bien lubricado hasta 0,5-0,7 para un deslizamiento seco, e incluso ≥ 5 para superficies metales limpias en el vacío.

Un cuerpo de peso W en una superficie plana empezará a moverse cuando la superficie es inclinada a cierto ángulo (el ángulo de fricción, θ) (**Figura 2.2**). El coeficiente de fricción estático es dado por

$$\mu_s = \tan\theta \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Esta representa una manera sencilla para medir μ_s , pero mediciones de fuerza son generalmente usadas para medir ambos coeficientes de fricción (dinámico y estático). Los resultados obtenidos de esas mediciones pueden, sin embargo, depender de la naturaleza de las superficies y también de algunas de las características de los sistemas de medición. Esta dependencia resalta el hecho

básico que el coeficiente de fricción no es una propiedad definida de los materiales.

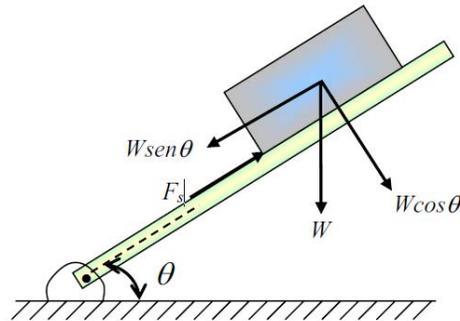


Figura 2.2 Plano inclinado usado para determinar el coeficiente estático de fricción, μ_s . Superficie plana inclinada con un pequeño ángulo, θ . necesario para iniciar el movimiento hacia abajo del cuerpo en el plano. Relación del ángulo de fricción con las principales fuerzas aplicadas. . Tomado de Tribology in Machine Desing, por T.A. Stolarski, 1990

La fricción estática es la resistencia que se debe superar para poner en movimiento un cuerpo con respecto a otro que se encuentra en contacto, por lo general es de mayor magnitud que la fricción dinámica, la cual es considerada una magnitud constante que se opone al movimiento una vez comenzado. No se tiene una idea realmente clara de la diferencia entre fricción estática y dinámica, pero se entiende que el coeficiente de fricción estático es mayor que el dinámico, ya que, al estar en reposo dos cuerpos se establecen entre ellos enlaces iónicos, moleculares y hasta incluso microsoldaduras que fortalecen la unión entre ellos, y una vez comenzado el movimiento estos enlaces desaparecen.

2.2.1 Fricción debido a la adhesión

Uno de los componentes más importantes de la fricción se origina de la formación y ruptura de las uniones adhesivas interfaciales. Extensos estudios experimentales y teóricos se han realizado para explicar la naturaleza de la interacción adhesiva, especialmente en el caso de de superficies metálicas

limpias. Haciendo énfasis en la estructura electrónica de los cuerpos en contacto friccionante. Desde un punto de vista teórico, fuerzas atractivas en la zona de contacto incluyen todas aquellas fuerzas las cuales contribuyen a la fuerza del sólido, como lo son las fuerzas metálicas de corto alcance, covalente e iónica, así como también las fuerzas de unión secundarias de Van der Waals como fuerzas de largo alcance (Stolarski, T.A. 1990).

El componente adhesivo de la fricción es dado por: la relación de la fuerza de corte interfacial de las uniones adhesivas a la fuerza de fluencia de la aspereza del material.

$$f_a = \frac{F_a}{W} \approx \frac{\tau_{12}}{P_y} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Para la mayoría de los materiales ingenieriles la relación está en el orden de 0.2 y significa que el coeficiente de fricción puede ser del mismo orden de magnitud. En el caso de materiales limpios, donde el crecimiento de la unión es común que tenga lugar, el componente adhesivo de la fricción puede incrementarse acerca de 10-100. La presencia de cualquier tipo de lubricante que interrumpa la formación de las uniones adhesivas puede reducir dramáticamente la magnitud del componente adhesivo de la fricción. Entonces, el componente de la fricción es dado por (Ver **Figura 2.3**).

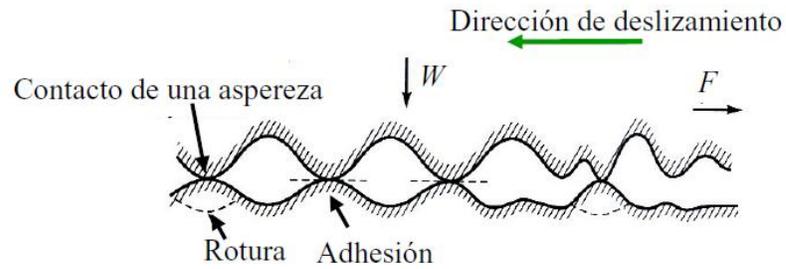


Figura 2.3 Fricción debido a la adhesión. Tomado de Tribology in Machine Design, por T.A. Stolarski, 1990.

$$f_a = \left(\frac{\tau_{12}}{P_y} \right) \left[1 - 2 \frac{\tan \theta W_{12}}{P_y} \right] \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde

$$W_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Progresos recientes en mecanismos de fractura nos permiten considerar la fractura de las uniones adhesivas como modo de falla debido a la propagación de grietas.

$$f_a = C \frac{\sigma_{12} \sigma_c}{n^2 (WH)^{1/2}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde σ_{12} es la fuerza de tensión interfacial, σ_c es el desplazamiento de grieta crítica, n es el factor de trabajo de endurecimiento y H es la dureza.

Es importante recordar que tal trabajo de fuerza de corte interfacial o la energía superficial caracterizan más a un par de materiales en contacto que los componentes individuales involucrados.

2.2.2 Fricción debido al arado (*Ploughing*)

El ploughing ocurre cuando dos cuerpos en contacto tienen diferentes durezas (Stolarski, T.A. 1990). En presencia de movimiento relativo entre dos cuerpos en contacto, las asperezas del cuerpo con la superficie más dura pueden penetrar en la superficie suave produciendo surcos en ella. Debido al arado una cierta fuerza es requerida para mantener el movimiento; en ciertas circunstancias esta fuerza puede constituir un componente principal de todas las fuerzas de fricción observadas. Hay dos razones básicas para el arado, llamadas, arado por asperezas superficiales y arado por partículas de intenso desgaste presentes en la zona de contacto (**Figura 2.4**). El caso de arado por las asperezas cónicas duras es mostrado en la **Figura 2.4** (a), y la fórmula para estimar el coeficiente de fricción es a siguiente:

$$f_p = \frac{2}{\pi} \tan \theta \quad (\text{Ec 2.7})$$

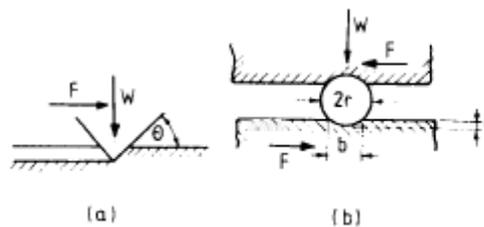


Figura 2.4 Fricción debido al arado (ploughing). Tomado de Tribology in Machine Design, por T.A. Stolarski, 1990.

Las asperezas en superficies ingenieriles rara vez tienen una pendiente efectiva, dada por Θ , superior de 5 a 6, de ello se traduce, por lo tanto, que el coeficiente de fricción de acuerdo a la **Ecuación 2.8**, debe estar en el orden de 0.04. Esto es, por supuesto, un valor demasiado bajo, principalmente porque el material acumulado al frente de la aspereza en movimiento no se toma en cuenta. El arado de un material quebradizo es inevitablemente asociado con microfrazas y, por lo tanto, el modelo del proceso de arado basado en mecanismos de fractura se está reconociendo. Propiedades del material tales como dureza de fractura, módulo elástico y de dureza son usados para estimar el coeficiente de fricción, el cual es dado por:

$$f_p = \frac{2}{\pi} \left[\left(\frac{2r}{b} \right)^2 \sin^{-1} \frac{b}{2r} - \left\{ \left(\frac{2r}{b} \right)^2 - 1 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{Ec. 2.8})$$

2.2.2 Fricción debido a la deformación

Energía mecánica es disipada debido a la deformación de cuerpos en contacto producida durante el deslizamiento (Stolarski, T.A. 1990). La técnica usual para analizar la deformación de asperezas de superficies individuales es la teoría de campo de línea-deslizamiento para un material perfectamente plástico y rígido. Un modelo de fricción línea-deslizamiento deformación, mostrado en la **Figura 2.5**, es basada en el análisis de dos dimensiones de Prandtl. Tres regiones distintas de deformación plástica del material pueden desarrollarse, en la **Figura 2.5**, ellas son denotadas por ABE, BED y BDC. El flujo de esfuerzo cortante del material define el máximo esfuerzo de corte el cual puede ser desarrollado en esas regiones. El coeficiente de fricción es dado por la expresión.

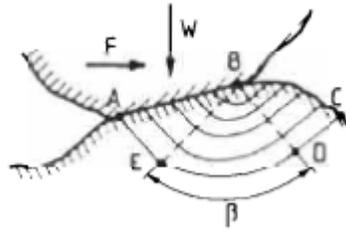


Figura 2.5 Fricción debido a la deformación. Tomado de Tribology in Machine Design, por T.A. Stolarski, 1990.

$$f_d = \frac{F}{W} = \lambda \tan \left\{ \arcsin \left[\frac{\sqrt{2}}{4} \frac{(2+\beta)}{(1+\beta)} \right] \right\} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde $\lambda = \lambda(E; H)$ es la porción de carga plástica soportada, E es el módulo elástico y H es la dureza.

La proporción de la carga soportada por las regiones deformadas plásticamente y relacionada, en una manera complicada, con la relación de la dureza del módulo elástico es un parámetro importante de este modelo. Para contactos plásticos de asperezas completos e inclinaciones de aspereza de 45° , el coeficiente de fricción es 1,0. Ese decrece a 0,55 para inclinaciones de asperezas cercanas a 0.

Otro enfoque de este problema es el asumir que el trabajo friccionante desarrollado es igual a el trabajo de la deformación plástica durante el estado de deslizamiento constante. Este modelo de fricción basado en la deformación plástica da la siguiente expresión para el coeficiente de fricción:

$$f_d = \frac{A_t}{W} \tau_{max} F \left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}} \right) \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right) = 1 - 2 \frac{\ln\left(1 + \frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right) - \left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right)}{\ln\left[1 - \left(\frac{\tau_s}{\tau_{max}}\right)^2\right]} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde A_t es el área real de contacto, τ_{max} denota la última fuerza de corte del material y τ_s es el promedio de las fuerzas de corte interfacial.

Generalmente como tipo de fricción, se entiende una clasificación del roce según la forma de movimiento o la disposición de los componentes sometidos a fricción. En base a esto se clasifica de la siguiente manera:

- Fricción por deslizamiento: Es la fricción dinámica existente entre los cuerpos que se deslizan entre si, como por ejemplo: discos de freno, cojinetes lisos, pistón en el cilindro, etc.
- Fricción por rodamiento: Es el roce que se da en los cuerpos que ruedan por rotación sobre una superficie, estos tienen teóricamente contacto en forma de punto o de línea. (contacto de punto: esfera; contacto de línea: cilindro) las fuerzas tangenciales producen una deformación elástica en el punto de contacto.
- Fricción Mixta: Este es un caso especial de la fricción por rodamiento donde también existe fricción por deslizamiento, se da generalmente en los rodamientos y engranajes.

2.3 Lubricación

La lubricación (ASM, 1992) es introducida entre dos sólidos en deslizamiento por la adición de un lubricante gaseoso, líquido o sólido en la interfaz de

deslizamiento en función de disminuir la fricción y el desgaste, disipar el calor y arrastrar cualquier resto generado durante el proceso de deslizamiento. Esas capas del fluido separan el contacto de cuerpos sólidos y son usualmente muy delgadas e incluso difíciles de observar. En general, el espesor de esas capas va de un intervalo de 1-100 μm , aunque pueden encontrarse capas más delgadas o más gruesas a las señaladas anteriormente. Por tanto, la lubricación relaciona el conocimiento con la mejora o el diagnóstico de la eficacia de éstas películas en la prevención de daños de los cuerpos en contacto sólido. El proceso de lubricación dependen de muchos factores que según la ASM (1992), depende de la geometría de los cuerpos en contacto, la rugosidad y textura de las superficies deslizantes, la carga de contacto, la presión y temperatura, las velocidades de deslizamiento, las condiciones ambientales, las propiedades físicas o químicas del lubricante, la composición del material y las propiedades de la capa cerca de la superficie.

Aunque no hay restricciones en el tipo de material requerido para formar una capa lubricación, un gas, líquido y ciertos sólidos son todos efectivos, el tipo de material influye es en el límite de efectividad de la capa.

Teniendo en cuenta la influencia de los diferentes tipos de lubricación (Stachowiak y Batchelor, 2005), los análisis llevados a cabo para lubricación con capas gaseosas o líquidas es usualmente tema de la “Lubricación Hidrodinámica”, mientras que la lubricación por sólidos es tema de la “Lubricación Sólida”. Una forma especializada de lubricación hidrodinámica que involucra la interacción física de los cuerpos en contacto y el lubricante líquido es conocida como “Lubricación Elastohidrodinámica” y es de considerable significado práctico. Otra forma de lubricación, que involucra las interacciones químicas entre los cuerpos en contacto y el lubricante líquido, es

conocida como “Lubricación Límite y de Presión Extrema”. Por último, una forma de lubricación que opera por el principio de separación de los cuerpos en contacto mediante una fuente de energía externa es la “Lubricación Hidroestática”, donde el lubricante, líquido o gas, es forzado a transitar en el espacio entre los cuerpos en contacto.

2.3.1 Tipos de lubricación

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, podemos definir los siguientes tipos de lubricación:

2.3.1.1 Lubricación Hidrodinámica

Lubricación característica de geometrías conformes y se produce cuando el fluido es forzado a través de una geometría convergente y, gracias al arrastre de las superficies en movimiento, hace que el fluido ingrese a la cuña separando las superficies en contacto. El gradiente de presiones mostrado en la **Figura 2.6**, que se generan en este tipo de lubricación son moderadas ($P_{max} = 5 \text{ MPa}$), de tal suerte que no se producen deformaciones elásticas en las superficies. Para este tipo de lubricación la viscosidad y densidad de los lubricantes líquidos son independientes de la presión.

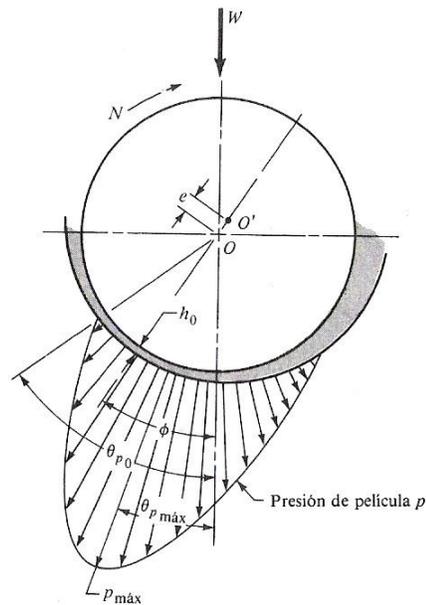


Figura 2.6 Gradiente de Presiones en Lubricación Hidrodinámica. Tomado de Diseño en Ingeniería Mecánica, por Joseph Edward Shigley y Larry D. Mitchell.

Las ecuaciones que gobiernan este fenómeno son las de Navier Stokes aplicadas a cuñas de fluido que con la integración de la ecuación de la continuidad conforman la conocida ecuación de Reynolds.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) = 12\mu U \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

2.3.1.2 Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

Puede ser definida (Stachowiak y Batchelor, 2005) como una forma de lubricación hidrodinámica donde la deformación elástica de los cuerpos en contacto y los cambios de viscosidad con la presión juegan un papel fundamental característico de geometrías no conformes, se presentan en mecanismos que funcionan sometidos a condiciones de altas cargas y bajas velocidades. Se presenta (Linares, 2005) en mecanismos en los cuales las

rugosidades de las superficies de fricción trabajan siempre entrelazadas y nunca llegan a separarse. En este caso las crestas permanentemente se están deformando elásticamente y el control del desgaste y el consumo de energía depende de la película adherida a las rugosidades. Se podría denominar esta película como límite pero de unas características de soporte de carga y de resistencia al desgaste mucho más elevadas que las que forma la película límite propiamente dicha. En la lubricación EHL la lubricación límite es permanente, esto implica que no hay mucha diferencia entre las condiciones de lubricación en el momento de la puesta en marcha del mecanismo y una vez que este alcanza la velocidad nominal de operación. En este tipo de lubricación mostrada en la **Figura 2.7** una vez que ocurre la deformación elástica (ya que no se excede el límite de fluencia del metal) la película de aceite queda atrapada entre las rugosidades formando una película hidrodinámica de un tamaño microscópico mucho menor que el que forma una película hidrodinámica propiamente dicha. En la lubricación hidrodinámica el espesor de la película lubricante puede ser del orden de 5 μm en adelante, mientras que en la lubricación elastohidrodinámica puede ser de 1 μm ó menos.

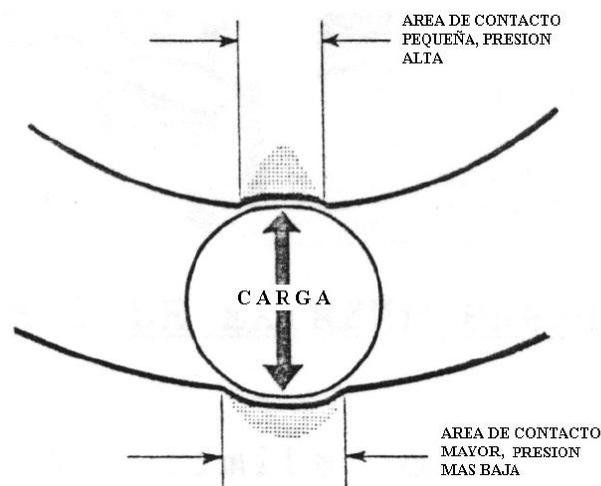


Figura 2.7. Lubricación Elastohidrodinámica. Tomado de Los lubricantes y sus aplicaciones, por Mundi Crespo.

2.3.1.3 *Lubricación Límite o de Presión Extrema*

La lubricación límite (Vázquez, 2005) ocurre cuando no se pueden establecer las condiciones operacionales para la lubricación hidrodinámica, es decir cargas muy altas o velocidades muy pequeñas, o una combinación de ambas. También se le llama lubricación imperfecta o escasa. En este tipo de lubricación se dice que el contacto es mixto, pues no hay separación completa de las superficies. Permanentemente se produce desgaste aunque es amortiguado por el efecto lubricante. Este régimen de lubricación es permisible cuando las cargas son bajas o por periodos de tiempo muy cortos. Podría decirse que la lubricación de extrema presión es un caso particular de la lubricación límite, para el cual las cargas son muy elevadas y se producen altas presiones superficiales y altas temperaturas.

2.3.1.4 *Lubricación Hidrostática*

La lubricación hidrostática se presenta cuando las superficies en rodamiento son separadas completamente por una capa de lubricante líquido o gaseoso, forzado a transitar el espacio por una presión externa (bomba externa). Ésta presión externa es la que garantiza mantener a las superficies de los dos cuerpos separadas como se muestra en la **Figura 2.8** y es utilizado generalmente en aplicaciones de muy baja velocidad. La película puede alcanzar grosores de 100 [μm] lo que asegura una total ausencia de fricción.

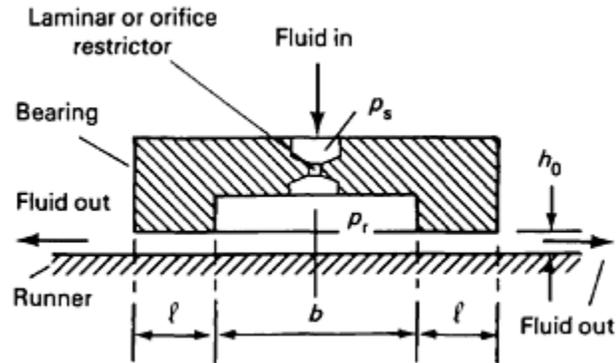


Figura 2.8. Lubricación Hidrostática. Tomado de Friction, Lubrication and wear technology por American Society of Metals, 1992, Vol. 18. *Nota:* P_s es la fuente de presión, P_r es la disipación de presión del fluido, h_0 es el espesor de la película, b es el diámetro de la cavidad del cojinete, l es el grosor de soporte de carga del cojinete.

El objetivo de la lubricación hidrostática (SKF, 2010) es formar una película de lubricante entre los elementos de fricción para evitar el desgaste y los movimientos bruscos durante los impactos. De este modo, los elementos de fricción permanecen separados incluso durante las paradas de la máquina.

Con ello se consigue:

- Alto grado de estabilidad y amortiguación
- Una vida del rodamiento ilimitada
- Ausencia de los movimientos bruscos por impacto
- Eliminación del desgaste de la superficie de deslizamiento
- Alto grado de estabilidad térmica
- Alto grado de seguridad en los impactos
- Precisión de posicionamiento absoluta
- Grado muy alto de precisión de mecanizado

2.3.1.5 Lubricación Sólida

La utilización de lubricantes sólidos se presenta cuando la lubricación líquida no es permisible dado que se requiere un alto grado de resistencia al desgaste,

alto grado de limpieza, se presenta difícil acceso del lubricante, existen cargas con extremas vibraciones, cuando se necesitan un trabajo en servicio a alta temperatura, en condiciones de vacío o en presencia de fuentes de radioactividad.

La investigación para la aplicación de lubricantes sólidos ha aumentado y diversificado considerablemente en el mercado con el fin de proporcionar mejores condiciones de operación para un estado u otro, no obstante, el rasgo más determinante para el éxito y eficacia de éste sistema de lubricación es el método de deposición del lubricante sobre las piezas sometidas a contacto, ya que (Stachowiak y Batchelor, 2005) incluso el lubricante más poderoso será fácilmente raspado o desgastado de la superficie si el método de deposición es incorrecto.

2.4 Desgaste

El desgaste es (Robinowicz, 1995) es un grupo de fenómenos que tienen en común la demolición de un material sólido entre superficies en movimiento relativo con fricción entre ellas. La naturaleza del medio circundante (sólido líquido o gaseoso), el tipo de cargas presentes en la interacción (deslizamiento en una dirección; alternativas, de impacto contacto rodante) y el mecanismo que se establece en esta interacción, ya sea mecánico o químico, permiten clasificar el desgaste en varios subtipos.

Robinowicz (1995) establece 4 tipos fundamentales y principales de desgaste que son los siguientes:

- Desgaste adhesivo
- Desgaste abrasivo

- Desgaste por fatiga
- Desgaste corrosivo

El desgaste abrasivo y adhesivo son formas de desgaste generadas bajo contacto plástico. En el caso de contacto plástico entre materiales similares, la interface de contacto tiene una fuerza de unión adhesiva. Cuando se supone que la fractura que se produjo fundamentalmente como consecuencia de una fuerte adhesión en la interfaz de contacto, el desgaste resultante se llama desgaste adhesivo, sin particularizar sobre el modo de fractura.

En el caso de contacto plástico entre un material duro y cortante y un material relativamente blando, el material mas duro penetra al más blando. Cuando se supone que la fractura se produjo en la forma de micro-corte por el material que penetra al otro, el desgaste resultante es llamado desgaste abrasivo.

En el caso de contacto rodante, la fractura de fatiga es generada después de repetidos ciclos de fricción. Cuando la superficie de falla es generada por la fatiga, el desgaste resultante es llamado desgaste por fatiga.

En el caso de contacto en un medio corrosivo, la reacción triboquímica en la interface de contacto es acelerada. Cuando la reacción triboquímica en el medio corrosivo se presenta se supone que es por la remoción de material, el desgaste resultante es llamado desgaste corrosivo. En el aire, el factor corrosivo más importante es el oxígeno, y el desgaste triboquímico de los metales en el aire es generalmente llamado desgaste oxidativo.

El desgaste por fatiga y el desgaste corrosivo pueden ser generados tanto en contacto elástico como en contacto plástico.

El material removido en el desgaste adhesivo, abrasivo o por fatiga es gobernado por la deformación y fractura en la región de contacto, mientras que

el material removido en el desgaste químico es determinado por el crecimiento de una reacción química en la superficie, donde las reacciones químicas son altamente activadas y aceleradas por deformación friccional, calentamiento friccional, microfractura y sucesiva remoción de productos de la reacción. En algunos casos, la remoción de material es gobernada por la fusión de la superficie causada por el calentamiento friccional o por el agrietamiento de la superficie debido al estrés térmico.

2.4.1 Desgaste Adhesivo

Cuando dos superficies limpias se oprimen bajo carga una contra otra, algunas de las asperezas en contacto tienen tendencia a adherirse recíprocamente por causa de fuerzas de atracción entre átomos superficiales en ambos materiales. Cuando se introduce deslizamiento entre superficies, estas adherencias se rompen, ya sea a lo largo de la interfaz original o a lo largo de un plano nuevo a través del material de los picos de asperezas. En este último caso, una parte de la pieza A es transferida a la pieza B, causando destrucción superficial y daño. Algunas veces, una partícula de uno de los materiales se romperá, quedando libre, y se convertirá en desecho dentro de la interfaz, capaz entonces de rayar la superficie y labrar surcos en ambas piezas. Este daño a veces se conoce como estriación o rayadura de la superficie. (Norton, 2005)

Un factor importante, que afecta la adhesión es la compatibilidad metalúrgica entre materiales en contacto. La compatibilidad metalúrgica entre dos materiales se define (Norton, 2005) como la alta solubilidad mutua o la formación de compuestos intermetálicos. Davies define dos condiciones para la incompatibilidad metalúrgica, que significa que los metales entonces pueden deslizarse uno sobre el otro con relativamente pocas raspaduras.

1. Los metales deben ser insolubles el uno en el otro, con ningún material que se disuelva en el otro ni forme una aleación con el otro.
2. Por lo menos uno de los materiales debe provenir del sub grupo B, es decir, los elementos a la derecha de la columna Ni-Pd-Pt de la tabla periódica.

El volumen en un desgaste adhesivo V es generalmente proporcional a la carga aplicada W y a la distancia de deslizamiento x y usualmente es inversamente proporcional a la dureza H de la superficie que es desgastada, por lo tanto el volumen desgastado esta dado por

$$V = \frac{K * W * L}{H} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

V: Es el Volumen de Desgaste [mm^3];

K: Es la Constante de Proporcionalidad o Coeficiente Adimensional de Desgaste;

$K/H=k$: Es el Coeficiente Dimensional de Desgaste [$\text{mm}^3/\text{N.m}$];

W: Es la Carga aplicada [N];

H: Es la Dureza del material [Pa];

L: Es la distancia de deslizamiento [m].

El coeficiente de desgaste K adimensional que depende de los materiales en contacto y su limpieza. Esta relación fue observada primero por Holm (1946) y Archard (1953).

Los valores obtenidos de K para materiales iguales, probados bajo las mismas condiciones, varían de una a otra prueba en un factor de alrededor de 2. Este tipo de variabilidad también se ve en pruebas de coeficientes de fricción, que suelen tener desviaciones estándar de $\pm 20\%$.

Según la ASM (1992) para prevenir el desgaste por adhesión existes ciertas recomendaciones como prevenir el uso de materiales similares en contacto sometidos a deslizamiento, evitar el uso de metales de muy alta durezas contra metales de durezas medianas ya que la superficie resultara dañada de forma considerable.

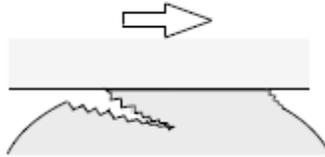


Figura 2.9 Desgaste adhesivo

Algunos materiales son más propensos a sufrir desgaste adhesivo de acuerdo a las propiedades físicas y químicas que estos presenten, tales como, electropositividad, reactividad química y capacidad de autopasivación; esta última, se refiere a la capacidad que tienen algunos metales de formar, en presencia de oxígeno, una capa de óxido protectora capaz de reducir la tasa de desgaste. Al igual que las propiedades de los metales, dependiendo del par tribológico, se encontraran diversos valores correspondientes a las fuerzas de adhesión presentes en ellos. Por ejemplo, ver *Tabla 2.1*, en la cual se presenta la fuerza de adhesión de varios metales que fueron desgastados contra el hierro.

Metal	Solubilidad en hierro [% atómico]	Fuerza de Adhesión en hierro [Mn]
Hierro		>4,0
Cobalto	35	1,2
Niquel	9,5	1,6
Cobre	<0,25	1,3
Acero	0,13	0,6
Oro	<1,5	0,5
Platino	20	1,0
Aluminio	22	2,5
Plomo	Insoluble	1,4
Tantalio	0,20	2,3

Nota: Tomado de Engineering Tribology, Gwidon W. Stachowiak

Tabla 2.1 Fuerza de Adhesión de Varios Metales Desgastados contra el Hierro en Vacío.

2.4.2 Desgaste Abrasivo

Es el desgaste que ocurre a temperaturas normales como resultado del contacto entre superficies metálicas producto de partículas duras o protuberancias duras abrasivas (Lipson, 1967), por lo tanto el desgaste abrasivo es definido como el daño sobre una superficie sólida que generalmente implica pérdida de material debido al movimiento relativo entre superficies sometidas a contacto. Generalmente ocurre cuando se produce contacto plástico entre un material duro y cortante y un material relativamente blando, el material más duro penetra al blando y se produce una fractura en forma de micro-corte por el material que indenta.

La abrasión es segmentada de acuerdo al número de cuerpos implicados en el desgaste (desgaste de dos y tres cuerpos, ver **Figura 2.10**). El desgaste de dos cuerpos ocurre cuando dos superficies sólidas de diferente dureza están en contacto directo y en movimiento relativo, y al aplicar una carga, las partículas de la superficie dura penetran en la de menor dureza produciendo deformaciones plásticas. El desgaste de tres cuerpos se refiere a cuando existen partículas duras alojadas entre las superficies deslizantes, o producto de la abrasión se desprenden y/o fracturan diversas partículas de la superficie de menor dureza, quedando éstas atrapadas entre las dos superficies deslizantes.



Figura 2.10 Desgaste abrasivo de dos y tres cuerpos

2.4.3 Desgaste por Fatiga

El desgaste por fatiga es también llamado fatiga superficial o desgaste de fractura superficial, y es causado cuando la superficie del material es sometida a cargas cíclicas y por el continuo deslizamiento o rodamiento de un componente sobre otro, el cual da lugar al desprendimiento o microagrietamiento del material (Ver **Figura 2.11**).



Figura 2.11 Desgaste por fatiga.

A diferencia de otros mecanismos de desgaste, el desgaste por fatiga es un fenómeno prolongado en el tiempo, no instantáneo, y producto de la continua deformación plástica e intensos esfuerzos localizados en contactos rodantes o puntuales de elementos de máquinas, como dientes de engranajes, rodamientos o levas; por lo que su efectiva consecución depende de la naturaleza cíclica de estas cargas además de la nucleación y propagación de grietas del material desgastado.

2.4.4 Desgaste Corrosivo

Este tipo de desgaste se produce cuando el deslizamiento de los cuerpos toma lugar en un medio corrosivo, y se inicia por la degradación de los materiales en los cuales está ocurriendo el desgaste físico, gracias a procesos químicos y electroquímicos. Generalmente la corrosión es un acompañante fijo en el proceso de desgaste en todos los ambientes, salvo en aquellos con atmósferas inertes o de vacío (ASM, 1992).

La corrosión es la reacción superficial de los electrones de la superficie de un metal con el medio que lo rodea o electrolito y su posterior formación de óxidos. Generalmente dicho deterioro de la superficie forma una capa dura pero frágil, que puede ser fácilmente removida para dejar expuesto nuevamente el material al ambiente corrosivo (Ver *Figura 2.12*). En algunos casos, las

partículas libres desprendidas de la película de corrosión pasan a formar parte del desgaste abrasivo de tres cuerpos.

Esta forma de desgaste puede ser controlada usualmente por una lubricación correcta, utilizando materiales con alto contenido de cromo y níquel, aplicando recubrimientos y por el control de ph del sistema.

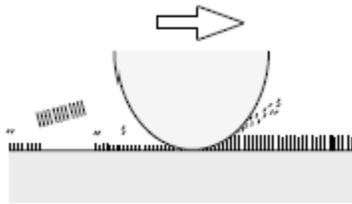


Figura 2.12 Desgaste corrosivo

2.4.5 Desgaste Erosivo.

El desgaste erosivo se refiere a la pérdida de material que resulta de impactos repetidos de partículas sólidas, líquidas o gaseosas contra una superficie. Cuando el ángulo de ataque es pequeño el desgaste producido tiende a ser parecido al de desgaste por abrasión, cuando el ángulo es normal a la superficie el material es deformado plásticamente o dislocado por fracturas.

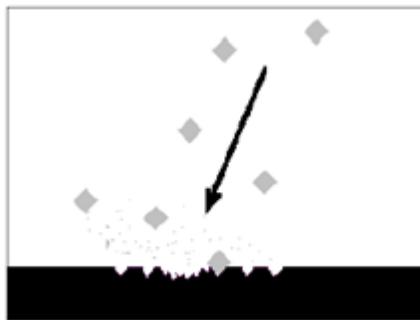


Figura 2.13 Desgaste Erosivo

La diferencia entre erosión y abrasión (ASM, 1992) se debe a que el primer fenómeno de desgaste se refiere a la fuerza ejercida de desaceleración sobre una serie de partículas que chocan y rebotan en la superficie, mientras que la abrasión es el resultado del deslizamiento de partículas abrasivas sobre una superficie por la acción de una fuerza externa aplicada generalmente constante.

El desgaste por erosión se ve principalmente afectado por el flujo de partículas, velocidad de partículas, ángulo de partículas y concentración de partículas. Las superficies sometidas a desgaste se conocen como dúctiles y frágiles.

2.5 Mapa de Mecanismos de Desgaste

El mapa de Mecanismo de Desgaste (Moros Hernán y Ruiz Heli, 2010) es una representación gráfica que provee distintos regímenes de desgaste. Los distintos modos dominantes de desgaste que en él se representan, son determinados de dos maneras: por la graficación de los datos obtenidos de experimentos desarrollados bajo distintas condiciones, y por el uso de modelos analíticos simples para tasas de desgaste debido a varios mecanismos. Aunque estos mapas pueden proveer solo predicciones aproximadas de las tasas de desgaste, ellos, sin embargo dan una información valiosa de los regímenes sobre los cuales los diferentes mecanismos de desgaste son importantes.

En su trabajo de modelo de desgaste, Williams (1999) establece un mapa de mecanismos de desgaste carga – velocidad para aceros de medio carbono basado en información proveniente de ensayos “pin-and-disc”. Tal como se muestra en la **Figura 2.14** las líneas gruesas delimitan los mecanismos de desgaste y las líneas delgadas indican iguales niveles del coeficiente adimensional de desgaste K , la presión normalizada $\tilde{p} = p/H$ representada por la presión normal sobre el espécimen dividida entre la dureza de la superficie

del área nominal en contacto, y la velocidad normalizada \tilde{V} definida como la velocidad de deslizamiento entre la velocidad de flujo de calor.

El mapa se divide en dos regiones, a la izquierda del mapa el desgaste es controlado esencialmente por procesos mecánicos, aquí el coeficiente de desgaste depende de la presión o carga de trabajo más que de la velocidad de deslizamiento, por lo que las líneas que definen el coeficiente son casi horizontales. Al otro lado, a mano derecha, el coeficiente de desgaste es controlado por los efectos térmicos y químicos y la representación del mismo se convierte en una curva dependiente de la carga y la velocidad de deslizamiento. Para aceros, este mecanismo fundamental de transición corresponde a velocidades de deslizamiento seco de 0.1 m. s^{-1} , bajo estas velocidades, el calentamiento de la superficie y la oxidación son relativamente insignificantes.

Aunque existen mapas específicos para cada acero, el diagrama general será similar para cuerpos en contacto relativo sin lubricación.

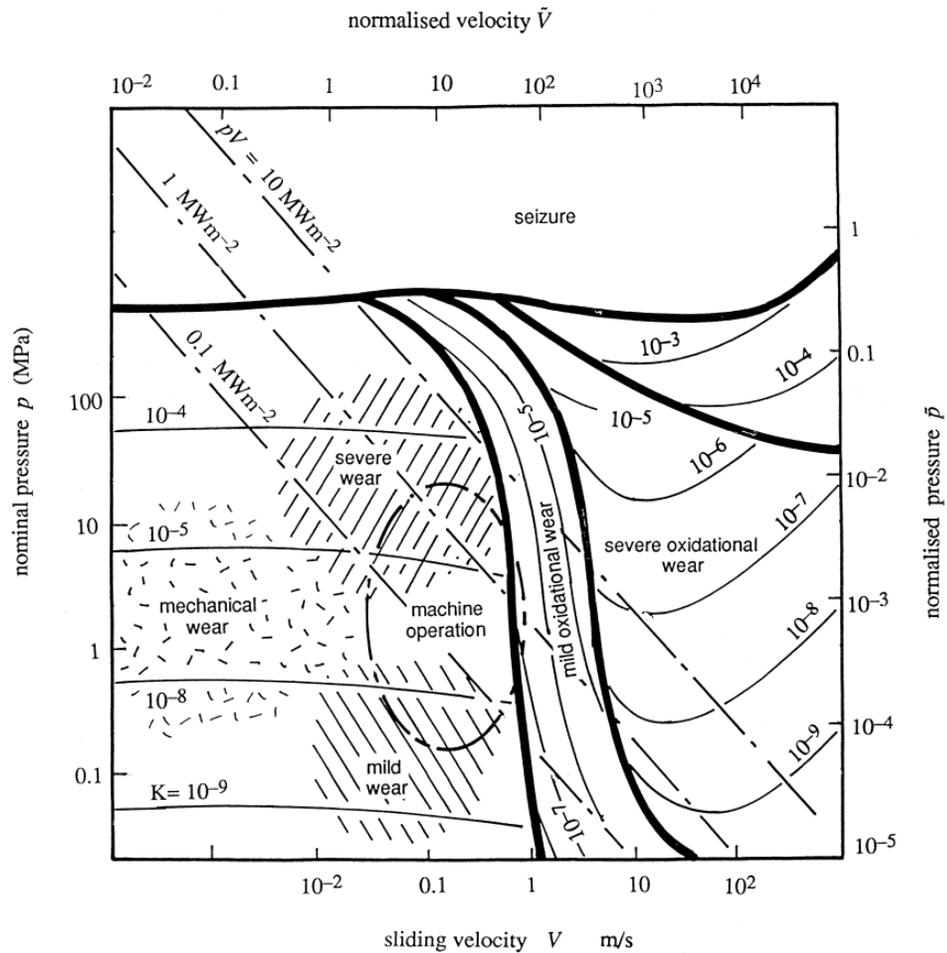


Figura 2.14 Mapa de Mecanismos de Desgaste. Tomado de Wear modeling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach, por Williams, 1999, Cambridge University Engineering Department.

2.6 Esfuerzo

La intensidad de una fuerza es llamada esfuerzo y es definida como la fuerza que actúa sobre un área superficial (Sandor, 1999). Un esfuerzo normal es definido como:

$$\sigma = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dF}{dA} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Donde dF es una fuerza diferencial normal actuando sobre un área diferencial dA . Es habitual llamar *esfuerzos de tensión* a los esfuerzos normales que generan tensión sobre la superficie de una sección. Por otra parte, aquellos que empujan contra ella son llamados *esfuerzos de compresión*. Es siempre valioso calcular el promedio de esfuerzo normal $\sigma = P/A$, donde P es la fuerza resultante en un área A . Un esfuerzo de corte τ causado por una fuerza cortante V es definido asimismo,

$$\tau = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dV}{dA} \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Un promedio de esfuerzo de corte es obtenido de V/A .

Es importante recordar que los esfuerzos normales resultan de componentes de fuerzas perpendiculares al plano de corte y los esfuerzos cortantes resultan de las componentes tangenciales al plano de corte.

De acuerdo con las definiciones, como ellos representan la intensidad de una fuerza sobre un área, los esfuerzos se miden en unidades de fuerza dividida entre unidades de área. En el sistema inglés, las unidades para el esfuerzo son las *libras* (lb) por *pulgada cuadrada* (in^2), abreviado *psi*. En muchos casos será conveniente usar como unidad de fuerza el término *kip* que significa kilolibra o mil libras. El esfuerzo en *kips* por pulgada cuadrada se abrevia *ksi*. Debe observarse que la unidad libra mencionada aquí, implica una libra-fuerza, no una libra-masa. Tales ambigüedades se evitan en la versión modernizada del sistema métrico decimal, que se conoce como Sistema Internacional de Unidades o unidades SI. Las unidades básicas del SI son el *metro* (m) para las longitudes, el *kilogramo* (kg) para la masa y el *segundo* (s) para el tiempo. La unidad derivada para el área es el metro cuadrado (m^2) y para la aceleración el

metro por segundo cuadrado (m/s^2). La unidad de fuerza se define como una masa unitaria sometida a una aceleración unitaria, es decir, un *kilogramo-metro por segundo cuadrado* ($kg.m/s^2$) que se designa como newton (N). La unidad de esfuerzo es el *newton por metro cuadrado* (N/m^2), designada también *pascal* (Pa).

2.6.1 Esfuerzo Normal para vigas en flexión

Las ecuaciones para el esfuerzo normal por flexión en vigas rectas están basadas en las siguientes hipótesis (Budynas-Nisbett, 2006):

1. La viga está sujeta a flexión pura. Esto significa que la fuerza de corte es cero, y que no hay torsión o cargas axiales presente.
2. El material es isotrópico y homogéneo.
3. El material obedece la Ley de Hooke.
4. La columna es inicialmente recta con una sección transversal constante en la longitud total de la viga.
5. La viga tiene un eje de simetría en el plano de flexión.
6. Las proporciones de la viga son tales que esta puede fallar por flexión en lugar de aplastamiento o pandeo.
7. Secciones transversales planas en la viga, permanecen planas durante la flexión.

En la **Figura 2.15** se puede visualizar una porción de una viga recta sometida a un momento flector positivo M representado por la flecha curva mostrando la acción física del momento junto a la flecha recta la cual indica el vector momento. El eje x coincide con el eje neutro de la sección, y el plano xz , el cual contiene el eje neutro de toda la sección transversal, es llamado plano neutro. Los elementos de la viga que coinciden con este plano no están sometidos a

esfuerzo. La ubicación del eje neutro coincide con el eje que une los centroides de las secciones transversales de la viga.

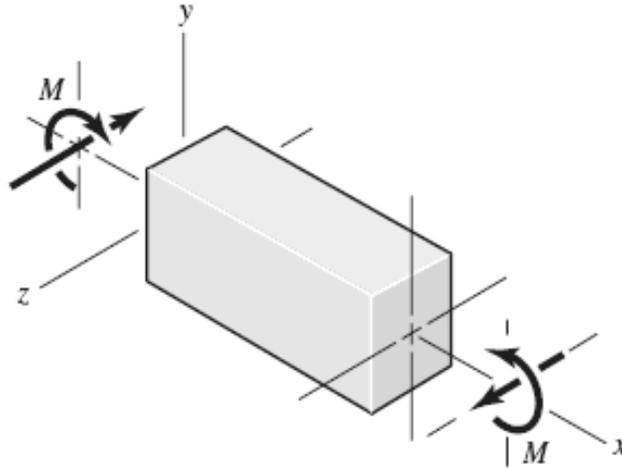


Figura 2.15 Viga recta en flexión positiva. Tomado de Shigley's Mechanical Engineering Design, por Budynast-Nisbett.

El esfuerzo debido a la flexión varía linealmente con la distancia del eje neutro y , y es dada por

$$\sigma_x = -\frac{My}{I} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde I es el segundo momento de área respecto al eje z . El cual es

$$I = \int y^2 dA \quad (\text{Ec. 2.17})$$

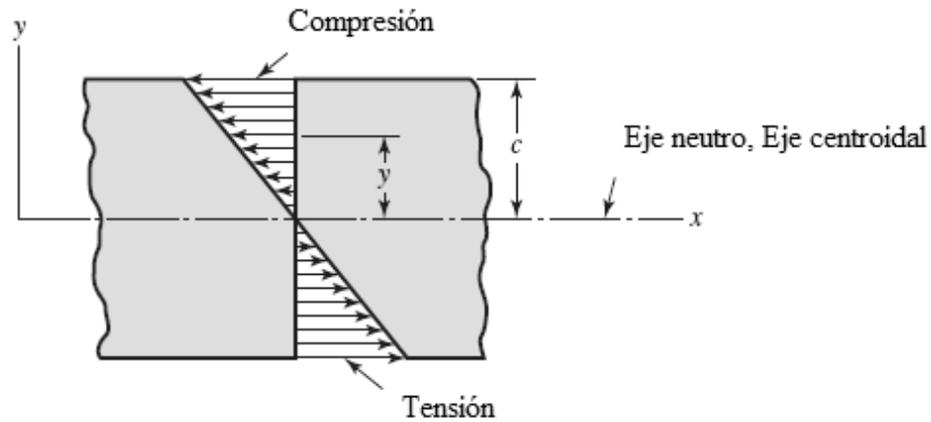


Figura 2.16 Distribución de esfuerzos para vigas en flexión. Tomado de Shigley's Mechanical Engineering Design, por Budynast-Nisbett.

La distribución de esfuerzo dada por la **Ecuación 2.16** es mostrada en la **Figura 2.16**. La máxima magnitud del esfuerzo debido a la flexión ocurrirá donde y tenga el mayor valor. Designando σ_{max} como la máxima magnitud del esfuerzo debido a la flexión, y c como la máxima magnitud de y , se tiene que:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

La **Ecuación 2.18** se puede utilizar para determinar si σ_{max} es en tensión o en compresión. La misma, también es también escrita como

$$\sigma_{max} = \frac{M}{Z} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde $Z=I/c$ es llamada *módulo de sección*.

$$Z = \frac{I}{c} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

2.6.2 Flexión elástica con cargas axiales

Una solución para la flexión pura respecto a un eje principal de un miembro puede ampliarse para incluir el efecto de cargas axiales empleando el principio de *superposición* (Popov, 2000). Tal enfoque es aplicable sólo en el rango del comportamiento elástico de los miembros.

Introduciendo el efecto de la carga axial, la **Ecuación 2.16** toma la forma generalizada

$$\sigma_x = -\frac{My}{I} + \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde P se considera positiva para fuerzas axiales de tensión y la flexión tiene lugar respecto al eje principal z .

2.7 Energía de deformación elástica en flexión pura

En mecánica, la energía se define como la capacidad de efectuar trabajo y éste es el producto de una fuerza por la distancia en la dirección en que actúa la fuerza (Popov, 2000). En cuerpos sólidos deformables, los esfuerzos multiplicados por sus áreas respectivas son fuerzas y las deformaciones son distancias. El producto de esas dos cantidades es el trabajo interno hecho en un

cuerpo por fuerzas aplicadas externamente. Este trabajo interno es almacenado en un cuerpo elástico como energía interna elástica de deformación o energía elástica de deformación unitaria. Se describirá continuación un procedimiento para calcular la energía interna en barras cargadas axialmente.

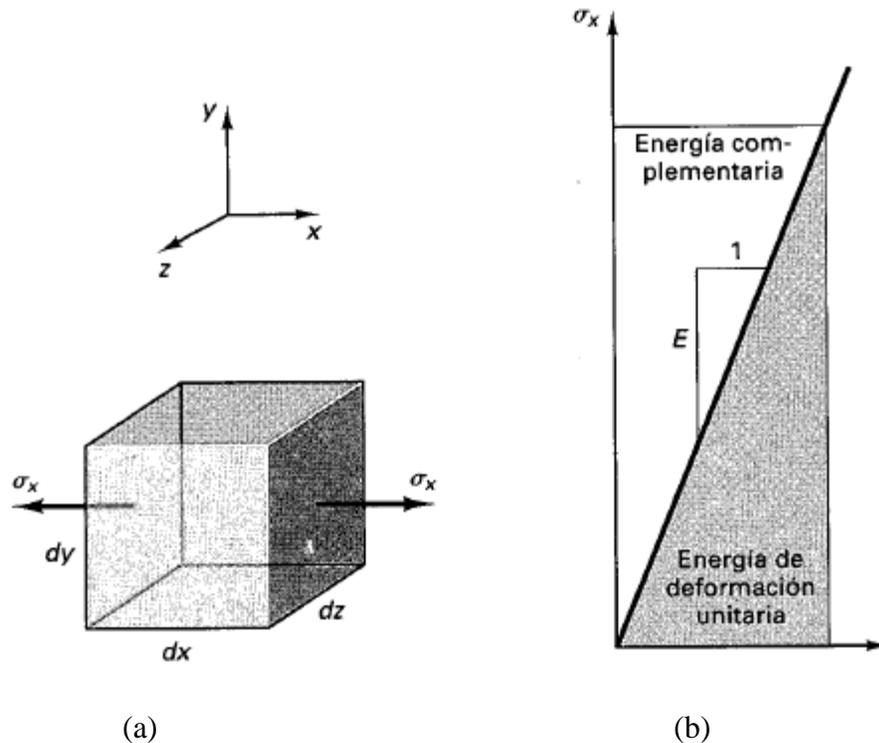


Figura 2.17 (a) Elemento en tensión uniaxial y (b) Diagrama hookeano esfuerzo-deformación unitaria. Tomado de Mecánica de Sólidos, por Egor P. Popov, 2000.

Si se considera un elemento infinitesimal como el mostrado en la **Figura 2.17 (a)** sometido a un esfuerzo normal σ_x . La fuerza que actúa sobre la cara derecha o la izquierda de este elemento es $\sigma_x dydz$, donde $dydz$ es un área infinitesimal del elemento. Debido a esta fuerza, el elemento se alarga una cantidad $\epsilon_x dx$, donde ϵ_x es la deformación unitaria normal en la dirección x . Si el elemento está hecho de un material elástico lineal, el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria; **Figura 2.17 (b)**. Por tanto, si el elemento está

inicialmente libre de esfuerzos, la fuerza que finalmente actúa sobre el elemento crece linealmente desde cero hasta alcanzar su valor pleno. La fuerza promedio que actúa sobre el elemento, mientras tiene lugar la deformación es $\frac{1}{2} \sigma_x dydz$. Esta fuerza promedio multiplicada por la distancia a través de la cual actúa, es el trabajo hecho sobre el elemento. Para un cuerpo perfectamente elástico, ninguna energía se disipa y el trabajo hecho sobre el elemento se almacena como energía interna de deformación unitaria recuperable. La energía interna de deformación unitaria elástica U para un elemento infinitesimal sometido a esfuerzo uniaxial es entonces

$$dU = \frac{1}{2} \sigma_x dydz \times \epsilon_x dx = \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x dx dy dz = \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x dV \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde dV es el volumen del elemento.

Reescribiendo en otra forma la **Ecuación 2.22**, se obtiene la energía de deformación unitaria almacenada en un cuerpo elástico por *unidad de volumen* del material o su *densidad de energía de deformación unitaria* U_o , Así entonces,

$$U_o = \frac{dU}{dV} = \frac{\sigma_x \epsilon_x}{2} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Esta expresión puede interpretarse gráficamente como un área bajo la recta inclinada del diagrama esfuerzo-deformación unitaria; **Figura 2.16**. Expresiones análogas a la **Ecuación 2.23** son aplicables a los esfuerzos

normales σ_y y σ_z y a las deformaciones unitarias normales ϵ_y y ϵ_z correspondientes.

Como en el rango elástico se aplica la ley de Hooke, $\sigma_x = E\epsilon_x$, la **Ecuación 2.23** puede escribirse como

$$U_o = \frac{dU}{dV} = \frac{E\epsilon_x^2}{2} = \frac{\sigma^2}{2E} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

o

$$U = \int_{vol} \frac{\sigma^2}{2E} dV \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Estas formas de la ecuación para la energía elástica de deformación unitaria son convenientes en las aplicaciones, aunque ellas ocultan la dependencia en la expresión de la energía de la fuerza y distancia.

En el caso de vigas en flexión pura, el esfuerzo normal varía linealmente desde el eje neutro como se muestra en la **Figura 2.14**, y de acuerdo con la **Ecuación 2.18**, este esfuerzo es en notación simplificada $\sigma_x = -\frac{My}{I}$. El volumen de un elemento típico infinitesimal de viga es $dxdA$, donde dx es su longitud y dA es su área transversal. Sustituyendo esas expresiones en la **Ecuación 2.25** e integrando sobre el volumen V de la viga, se obtiene la expresión para la energía de deformación elástica U en una viga en flexión pura:

$$U = \int_{vol} \frac{\sigma^2}{2E} dV = \int_{vol} \frac{1}{2E} \left(-\frac{My}{I}\right)^2 dx dA \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Reordenando términos y recordando que M en una sección de una viga es constante y que el orden de efectuar la integración es arbitrario,

$$U = \int \frac{1}{2E} \left(-\frac{My}{I}\right)^2 dx \int_{\text{área}} y^2 = \int_0^L \frac{M^2 dx}{2EI} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

donde la última simplificación es posible ya que, por definición, $I = \int y^2 dA$. La **Ecuación 2.26** reduce la integral de volumen para la energía elástica de vigas prismáticas en flexión pura a una integral simple tomada sobre la longitud L de una viga.

2.8 Teorema de Castigliano

En el caso de materiales que cumplan la ley de Hooke y para desplazamientos pequeños, puede establecerse, deducido de la expresión de energía de deformación de una viga en flexión pura (**Ec. 27**), un método sencillo para el cálculo de los corrimientos de los puntos de un cuerpo elástico durante la deformación. La energía de deformación de un sistema puede expresarse por una función homogénea de segundo grado de las fuerzas exteriores, y su derivada parcial, con relación a una fuerza cualquiera, da el desplazamiento

correspondiente a dicha fuerza. Dicho esto el desplazamiento δ de una viga en flexión pura queda expresado de la siguiente manera

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{1}{EI} \int_0^l M \frac{\partial M}{\partial P} dx \quad (\text{Ec. 2.28})$$

2.9 Deformación

Los materiales sólidos se deforman cuando las fuerzas actúan sobre ellos. Grandes deformaciones son posibles en algunos materiales. Deformaciones extremadamente pequeñas son difíciles de medir, pero ellas pueden ser significantes en los cambios críticos de geometría o en la evolución gradual del daño. Las deformaciones normalmente no son uniformes incluso en elementos de máquinas y estructuras aparentemente uniformes. La deformación se puede definir separadamente por el cambio volumétrico y la distorsión angular de un cuerpo. (Sandor, 1999).

Si una carga de tensión es aplicada a una barra derecha, ella se vuelve más larga (Marguitu, 2001). La elongación por unidad de longitud de la barra ϵ es llamada *deformación*. La expresión para la deformación es dada por

$$\epsilon = \frac{\delta}{l} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Donde δ es la elongación total (deformación total) de la barra de longitud l .

Deformación cortante γ es el cambio en ángulo recto de un elemento sometido a esfuerzo de corte puro.

La *Elasticidad* es una propiedad de los materiales que permite que los mismos retomen su geometría original cuando la carga es removida. La elasticidad de un material puede ser expresada en términos de la ley de Hooke, la cual establece, dentro de ciertos límites, que el esfuerzo en un material es proporcional a la deformación producida por este. Por lo tanto la Ley de Hooke puede ser escrita como

$$\sigma = E\epsilon, \quad \tau = G\gamma \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Donde E y G son constantes de proporcionalidad. La constante E es llamada *módulo de elasticidad* y la constante G es llamada *módulo de corte de elástico* o *módulo de rigidez*. Un material que obedece la Ley de Hooke es llamado *elástico*.

Sustituyendo $\sigma = F/A$ y $\epsilon = \delta/l$ en la ecuación anterior, se puede obtener una expresión para la deformación total de una barra cargada en tensión o compresión axial.

$$\delta = \frac{Fl}{AE} \quad (\text{Ec. 2.31})$$

Cuando una carga de tensión es aplicada a un cuerpo, no solo se produce una deformación axial, sino que también ocurre una lateral. Si el material obedece la Ley de Hooke, ha sido demostrado que las dos deformaciones son

proporcionales entre sí. Esta constante de proporcionalidad es llamada *relación de Poisson*, dada por

$$v = \frac{\textit{deformación lateral}}{\textit{deformación axial}} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

Y las constantes elásticas están relacionadas por

$$E = 2G(1 + v) \quad (\text{Ec. 2.33})$$

2.10 Galga extensométricas.

Para determinar el estado de deformación en un sólido se pueden usar técnicas experimentales para verificar los resultados teóricos obtenidos mediante el uso de algún modelo matemático o para evaluar esfuerzos en situaciones en donde resultan muy complicadas las aproximaciones matemáticas. Los medidores de deformación se pueden clasificar en cuatro clases de acuerdo a su construcción: Mecánicos, Ópticos, Eléctricos y Acústicos.

Hasta ahora no se ha desarrollado un aparato para medir esfuerzos con todas las características que se desean, pero las galgas extensométricas de resistencia eléctrica están muy cerca de satisfacer todos estos requerimientos. Las galgas extensométricas (según Raúl Goncalves 2002) son medidores de resistencia eléctrica, el principio de operación de estos medidores se basa en el hecho de que la resistencia eléctrica de un material conductor de electricidad varía cuando se le somete a cargas externas. Los tres aspectos básicos para la construcción y desarrollo de galgas de resistencia eléctrica son:

1. La resistencia de un conductor de sección constante cambia como una función de la deformación.
2. Cada material conductor tiene diferentes sensibilidades.
3. Se puede medir con mucha precisión el cambio de resistencia en un elemento conductor.

La resistencia de un conductor de sección uniforme está dada por:

$$R = \rho * \frac{L}{A} \quad (\text{Ec. 2.34})$$

Donde R es la resistencia del conductor en Ohms (Ω), L la longitud del conductor, A es el área de sección transversal del conductor y ρ es la resistividad (propiedad del material, depende de la temperatura).

Si un alambre recto se estira elásticamente, la longitud aumentará y la sección transversal se reducirá por el efecto de Poisson. De la ecuación se observa que ambos efectos son aditivos y causan que la resistencia aumente, permaneciendo la resistividad constante.

Este medidor funciona según este principio, se adhiere o une íntimamente a la superficie del sólido y, por consiguiente, se deforma junto con este. Al hacerle pasar una corriente eléctrica a través del conductor mientras se aplica el sistema de cargas a la pieza, la variación de la intensidad de la corriente puede determinarse (puesto que la resistencia R varía) y establecerse así una escala adecuada entre la intensidad de corriente y la variación de la longitud.

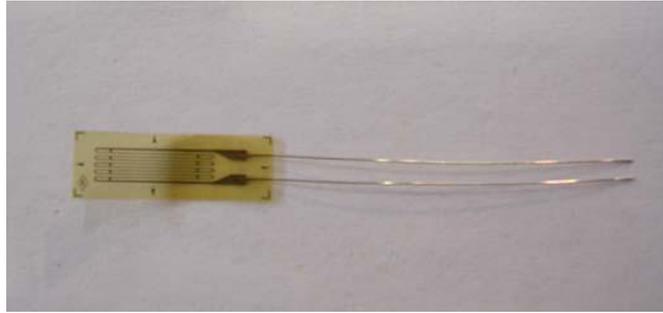


Figura 2.18 Representación de una galga extensométrica unidireccional.

2.11 Simuladores de Análisis por Elementos Finitos

Actualmente existen en el mercado una amplia gama de paquetes de software para simulación que operan por una técnica numérica asistida por computador, a partir del cual la pieza, objeto o sistema se puede representar por un modelo geométrico conformado por regiones discretizadas y conectadas entre sí, sobre las que se aplican consideraciones físicas, relaciones constitutivas y ecuaciones en donde las variables desconocidas son calculadas por métodos algebraicos lineales o esquemas no lineales. Uno de estos paquetes de software es ANSYS.

2.11.1 Programa de simulación ANSYS

ANSYS (**Swanson Analysis Systems**), es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos

ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador y post-procesador. Tanto el pre-procesador como el post-procesador están previstos de una interfaz gráfica. Este procesador de elemento finito para la solución de problemas

mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no-lineales), análisis de transferencia de calor y fluidodinámica, y también problemas de acústicas y de electromagnetismo. Usualmente el uso de estas herramientas se utiliza simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo. Este software es usado también en ingeniería civil y eléctrica, física y química.

Diseñadores, ingenieros e investigadores pueden realizar pruebas virtuales para evaluar la viabilidad de un diseño o para evaluar el desempeño del producto real durante la fase de desarrollo. ANSYS también ayuda a los fabricantes a reducir el número de prototipos físicos, minimizar los costos para el desarrollo y acelerar la innovación mediante la simulación del mundo real del producto y el comportamiento del proceso.

2.12 Microscopia electrónica de barrido (MEB).

El Microscopio electrónico de barrido permite examinar la fotografía y composición de la muestra utilizando un haz de electrones, el cual interactúa con la superficie de la muestra generando, entre otras señales, electrones retrodispersados y secundarios, los cuales pueden utilizarse para la formación de la imagen y señales de rayos X característicos para el análisis elemental.

La característica fundamental de un microscopio electrónico de barrido es que la imagen se forma punto a punto a partir el barrido de la muestra con un haz de electrones. Este haz de electrones genera electrones secundarios, los cuales son detectados y posteriormente utilizados para modular la señal en un tubo de rayos catódicos (TRC), la cual esta sincronizada con la unidad de barrido del microscopio electrónico.

Para realizar las observaciones en el MEB, las muestras deben ser recubiertas con un material conductor (Au/Pd, grafito, etc). Se cuenta con diferentes equipos que permiten realizar este cubrimiento, entre ellos tenemos el evaporador de alto vacío y el cubridor iónico.

2.13 Dureza.

La dureza (Maryory Gómez, 2005) es una medida de la resistencia de un material a la deformación permanente. Por ejemplo, en metalurgia dureza es la resistencia de un material a ser penetrado; mientras que en mineralogía es la resistencia al rayado. Las pruebas de dureza son un método de inspección muy común, que se utilizan para las propiedades mecánicas de un material, debido a la relación que existe entre la dureza y otras propiedades mecánicas del material. Entre la medida de la dureza y la prueba de tracción que mide la resistencia de un material a ser estirado o comprimido, su modulo elástico, su límite elástico y su tenacidad, estos resultados pueden ser paralelos uno del otro; pero la dureza es una prueba más simple de aplicar y relativamente no destructiva.

La dureza no es una propiedad fundamental de un material. Los valores de dureza no son absolutos y no hay estándares universales de estos valores. La dureza solamente tiene un valor cuantitativo en términos de la deformación producida de un indentador de forma específica, con una carga aplicada, por un tiempo dado. El principal propósito de la medida de dureza es determinar si un material o el tratamiento particular al que ha sido sometido son adecuados para un uso específico. Existen los métodos estáticos y dinámicos de medida de dureza.

2.13.1 Método de rayado para medida de dureza.

Los primeros métodos de medida de dureza consistieron en hacer una prueba de rayado, con el fin de determinar si el material es capaz o no de rayar a otro y siendo así se considera a este material que es capaz de rayar como el más duro de los dos. De acuerdo con este concepto en 1822, se introdujo la escala de Mohs (*Tabla 1.4*) de dureza para minerales. En el caso de los recubrimientos duros la mayoría estarían en esta escala entre el cordón y el diamante, ya que con prácticamente todos estos recubrimientos modernos se puede rayar al corindón pero no el diamante, por lo tanto, esta escala la dureza presenta un margen demasiado amplio en el que no se podría distinguir entre la mayoría de los recubrimientos que existen actualmente.

Mineral	Número en la escala
Talco	1
Yeso	2
Calcita	3
Fluorita	4
Apatita	5
Feldespato	6
Cuarzo	7
Topacio	8
Corindón	9
Diamante	10

Tabla 2.2 Escala de Mohs de dureza de minerales

2.13.2 Métodos de indentación estática para medida de la dureza

Más tarde surgieron métodos de indentación estática, los cuales son métodos convencionales que se han utilizado y se utilizan en nuestros días en aplicaciones metalúrgicas industriales. En estos ensayos un indentador de geometría determinada penetra en la superficie de una muestra cuando se aplica

sobre el una fuerza grande conocida (Apoyando una masa calibrada sobre el indentador). La dureza H se evalúa a partir de la magnitud de la deformación plástica o permanente observada sobre el material cuando el indentador es retirado. La superficie deformada se determina mediante la medida de la penetración del indentador o bien midiendo directamente el área de la huella residual sobre la superficie del material, la dureza se calcula a través de la expresión de (Johnson):

$$H = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 2.35})$$

Donde P es la fuerza normal aplicada y A el área superficial de la huella residual. A continuación se describen los principales métodos de indentación estáticos utilizados para medir la dureza.

- **Métodos Brinell y Rockwell**

En el siglo XIX el ingeniero sueco Brinell presento un artículo a la sociedad sueca de tecnología describiendo en su prueba de “bola” que llego a ser universalmente usada en la industria del metal. Muchas maquinas han sido desarrolladas para hacer medidas de dureza, pero el principio ha permanecido esencialmente invariable. La prueba Brinell involucra la indentación de la muestra con un indentador esférico de acero endurecido o carburo de tungsteno de 10 mm de diámetro de la huella residual d (ambos en mm), el número de dureza Brinell está dado por:

$$HB = \frac{2P}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{Ec. 2.36})$$

El diámetro de la impresión d es medido en el plano de la superficie original de la pieza y P es la fuerza utilizada. En las medidas de dureza Brinell se aplica la carga final al menos durante 30 segundos.

La prueba de dureza Rockwell fue ideada por Rockwell en 1919 y es muy similar a la prueba Brinell. En la prueba Rockwell se utiliza como indentador un cono de diamante con un ángulo de 120° con una punta de $200\ \mu\text{m}$ de radio. A esta medida se le asigna un número tabulado que depende de las condiciones de medida (indentador y masa), especificadas en escalas de la A a la V (Boyer). La **Figura 2.19** muestra la geometría Brinell y Rockwell. Las durezas Rockwell involucran una profundidad de ensayo en la pieza menor que las durezas Brinell y también contemplan valores de dureza superiores, por lo que son adecuadas para piezas de acero sometidas a tratamientos térmicos superficiales.

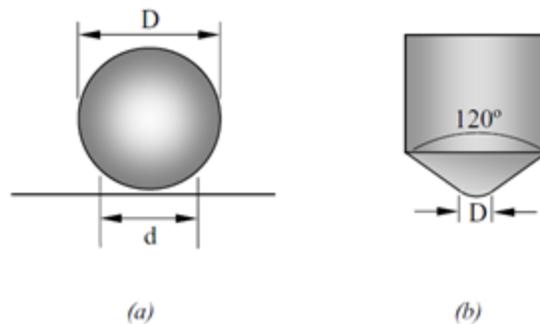


Figura 2.19 Geometría de los indentadores (a) Brinell y (b) Rockwell.

- **Método Vickers.**

El método Vickers nació en 1925 y continúa siendo el más utilizado en la actualidad a nivel industrial. El indentador Vickers tiene la forma de una pirámide base cuadrada con un ángulo epical de 136° entre las caras (ángulo de aristas 148°). La dureza Vickers se calcula usando la carga del indentador P y el

área superficial de la impresión permanente. La presión de contacto media p_m está dada por la carga dividida por el área proyectada de la impresión. La dureza Vickers se calcula mediante la ecuación:

$$HV = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{136^\circ}{2} = 1,86 \frac{P}{d^2} \quad (\text{Ec. 36})$$

Con d (mm) igual a la longitud de la diagonal medida como es mostrado en la **Figura 2.20**. En la práctica el valor de la diagonal que se utiliza es la media de los dos diagonales medidas. Debido a que el vértice de la pirámide del indentador de diamante Vickers puede ajustarse muy agudo, es posible realizar indentaciones de pequeñas profundidades (decimas de micra) por este motivo la dureza Vickers suele denominarse microdureza. La determinación del tamaño de la indentación debe efectuarse mediante microscopio óptico de bastantes aumentos, por lo que este indentador está generalmente montado en el cuerpo de un microscopio metalúrgico de calidad.

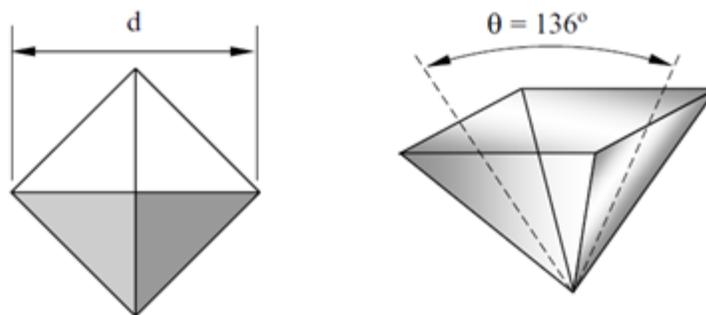


Figura 2.20 Geometría del indentador Vickers.

- **Método Knoop.**

El indentador Knoop es similar al indentador Vickers, excepto que la pirámide de diamante tiene diagonales de longitudes desigual, resultando en una impresión que tiene una diagonal con una longitud siete veces la diagonal más corta. Los ángulos para las caras opuestas del indentador Knoop son 172.5° y 130° , *Figura 2.21*. El hecho que una diagonal sea mayor facilita la visualización al microscopio y la medida del tamaño de la impresión. El indentador Knoop es particularmente útil para el estudio de materiales altamente frágiles debido a que permite visualizar una profundidad más pequeña de penetración y por tanto una carga de indentador inferior. La dureza Knoop es calculada así:

$$HK = \frac{2P}{d^2 \left[\cot \frac{172,5^\circ}{2} \tan \frac{130^\circ}{2} \right]} \quad (\text{Ec. 37})$$

La longitud d (mm) de la diagonal más larga para determinar el área de la impresión.

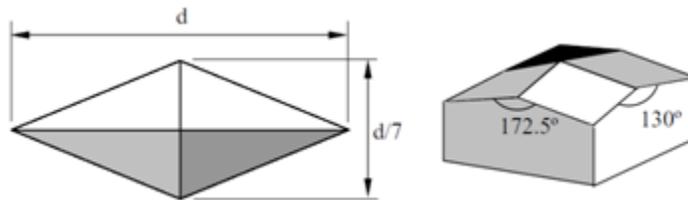


Figura 2.21 Geometría del indentador Knoop.

En estos métodos de indentación estática usualmente se aplican grandes cargas, cuando las cargas aplicadas son superiores a los 10 N, las pruebas son referenciadas como pruebas de macrodureza (Rockwell, Brinell), las cuales se utilizan para medir sobre materiales en volumen. Para medir microdureza (Vickers, Knoop) se aplican cargas inferiores a 10 N con las cuales se mide la

dureza de recubrimientos o de tratamientos superficiales con espesor equivalente a varias micras. En las medidas de nanodureza (pruebas de indentación dinámica) se aplican cargas en la escala de mN y estas medidas se realizan sobre recubrimientos con un espesor a la micra, limitando las penetraciones del indentador a unas decenas o centenares de nanómetro.

2.14 Tensiones residuales.

Las tensiones residuales (Maryory Gómez, 2005) son aquellas que existen en el interior de un material cuando no actúa ninguna fuerza ni momento exterior sobre él, estas tensiones internas se equilibran mutuamente. Las tensiones internas producen deformaciones de los granos cristalinos, pueden causar grietas y deformaciones en los materiales en volumen e incluso manifestarse externamente como una deformación de la pieza entera. En los recubrimientos, las tensiones residuales en la capa o bien en el sustrato o en ambos pueden causar fallos en la adhesión y también causar fallos de la resistencia a la corrosión de la capa. Las tensiones internas pueden ser, en cada punto, tensiles o compresivas y pueden modificar localmente propiedades de los materiales tales como: dureza, tenacidad, límite elástico, la resistencia a la oxidación en los metales y también las propiedades eléctricas y ópticas en los semiconductores (Ficher-Cripps). Las tensiones ténsiles son generalmente definidas como tensiones de signo negativo y las tensiones compresivas como tensiones de signo positivo, la asignación de este signo es puramente arbitraria. Las tensiones internas pueden ser homogéneas en el volumen o no, isotrópicas o no y pueden ser mono, bi o triaxiales, estas últimas llamadas también hidrostáticas.

2.14.1 Orígenes de las tensiones residuales.

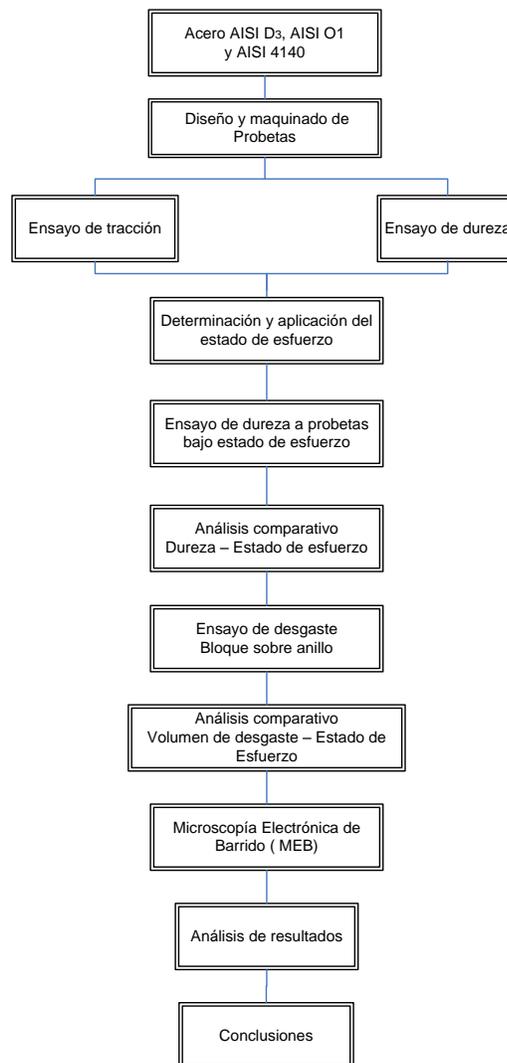
Las tensiones internas en las capas delgadas y en los materiales en volumen se originan en la respuesta elástica de regiones internas del material que sufren deformaciones elásticas (compresiones o dilataciones) provocadas por la deformación plástica (o elástica) de las regiones próximas. En materiales con una sola fase, se dan en casos como: dos partes unidas y con diferentes coeficiente de dilatación térmica, dos cristales unidos epitaxialmente y con parámetro de red no exactamente igual en ambos y en un, material homogéneo que ha sufrido una modificación en una parte, como por ejemplo la implantación iónica en una región superficial y no en la parte contigua. En los materiales multifase y en los “composites” siempre existen tensiones residuales internas consecuencia de las diferencia de los coeficientes de dilatación térmica de cada fases y también de los posibles cambios de estructura cristalina ocurridos en alguna de las fases a lo largo del proceso de enfriamiento después de su fabricación. Los materiales amorfos, como el vidrio también puedes presentar grandes tensiones residuales internas debido a diferencia de temperatura local en el proceso de solidificación de la pieza.

La macrotensiones son homogéneas a escala al menos en una dimensión. Las microtensiones pueden existir en ausencia de macrotensiones, son inhomogeneas a escala microscópica pero aleatoriamente distribuidas a escala macroscópica. Las microtensiones pueden ser causadas por macrotensiones debido a incompatibilidad elástica entre microdominios (granos cristalinos) y a deformaciones plásticas diferentes entre distintos microdominios. Otras causas son: precipitados de fases cristalinas, recristalización de microdominios amorfo, inclusión de impurezas, implantación iónica, distorsión de gasea y corrosión.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Diagrama Experimental



3.2 Materiales y Métodos

Los aceros utilizados para los ensayos fueron un AISI 4140, AISI O1 y AISI D3, con los cuales, en estado natural y como fueron adquiridos en la empresa comercializadora de aceros FERRUM C.A, se procedieron a mecanizar las probetas para el Ensayo de Tracción y Dureza, como para el ensayo de Bloque sobre Anillo. No fue aplicado ningún tratamiento térmico previo ni posterior a la mecanización de las probetas.

La composición química de cada uno de los materiales los clasifica como un acero de elementos de maquina al AISI 4140 y aceros para herramientas al AISI O1 y AISI D3. El porcentaje de elementos químicos que conforma cada uno de los materiales fue tomado del certificado de calidad facilitado por el distribuidor, esta composición es detallada en la Tabla 3.1, Tabla 3.2 y Tabla 3.3. Las propiedades estáticas de cada material fueron determinadas en los Laboratorios de Metalografía y de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela.

Acero AISI 4140							
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
0,43	0,23	0,76	0,006	0,02	0,95	0,07	0,15

Tabla 3.1 Composición Química para el Acero AISI 4140.

Acero AISI D3					
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr
1,98	0,22	0,27	0,018	0,0003	11,24

Tabla 3.2 Composición Química para el Acero AISI D3.

Acero AISI O1							
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%V	%W
0,94	0,25	1,07	0.008	0,001	0,53	0,07	0,53

Tabla 3.3 Composición Química para el Acero AISI O1.

La geometría de las probetas de tracción se realizó según la norma ASTM E-8, en las dimensiones especificadas. Para el ensayo de dureza, se realizaron dos procedimientos el primero con el objetivo de determinar la dureza del material, ensayando bloques cilíndricos que se obtuvieron de los tochos de cada material cumpliendo con las especificaciones de la norma ASTM E 92-82. La segunda prueba se realizó sobre probetas con la misma configuración geométrica que las utilizadas para el ensayo bloque sobre anillo. Se seleccionaron tres probetas de cada material a las que se le aplicara una carga distinta y se medirá la dureza en el material.

Tomando en cuenta que para evaluar el fenómeno en estudio y la prueba utilizada es el ensayo bloque sobre anillo, ha sido modificada la geometría del bloque sugerido por la norma ASTM G77 – 98 con el objetivo de asegurar un estado de esfuerzo constante durante el transcurso de la prueba, la nueva probeta presenta una sección transversal en forma de U y mantiene inicialmente una superficie de contacto plana con el anillo, por lo que quedó representada bajo las siguientes dimensiones:

Bloque:

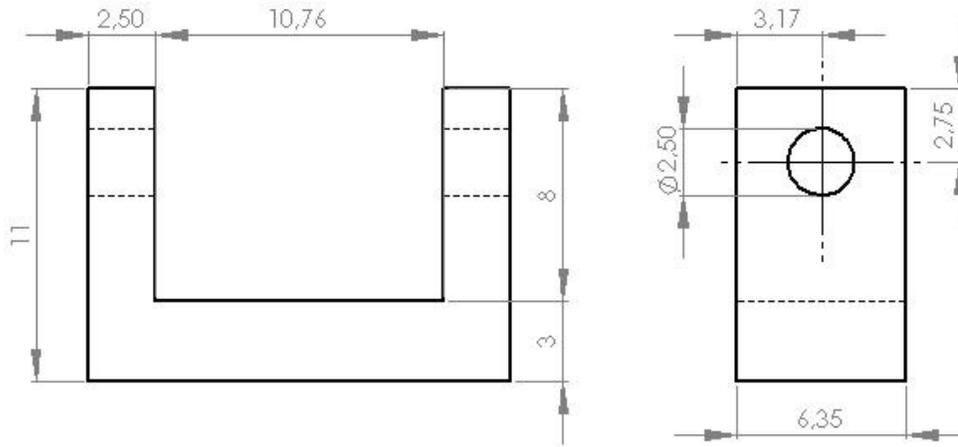


Figura 3.1 Geometría del Bloque Conforme. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm]

Anillo:

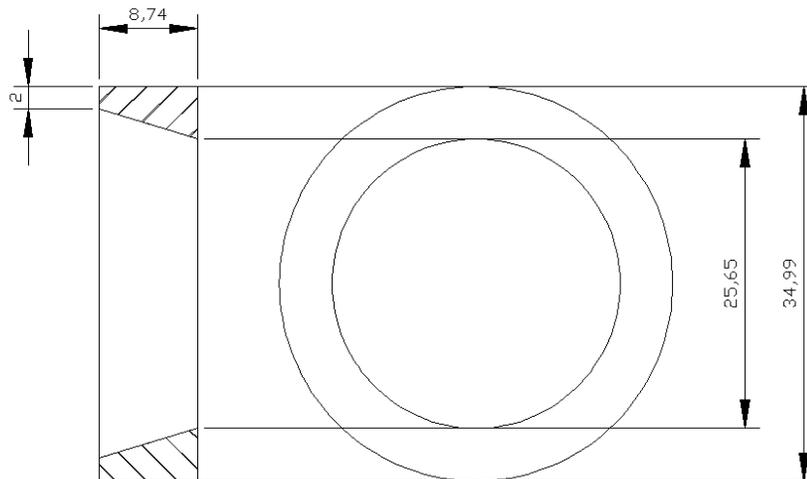


Figura 3.2 Geometría del Anillo. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm]

Todas las probetas, tanto bloques, anillos como especímenes de tracción, se resguardaron en un ambiente cerrado asegurando la menor cantidad de humedad posible. Se utilizaron bolsas de sílica restauradas mediante

calentamiento en horno a 150 °C durante 20 min. a fin de garantizar la capacidad de absorción de humedad.

3.2.1 Bloques

Debido a la necesidad de establecer un estado de esfuerzo durante la ejecución del ensayo, se realizó el diseño de un bloque con sección transversal en forma de U y superficie inicial de contacto plana cuya configuración (Ver Figura 3.3) permitió establecer un estado de tensión o compresión, de magnitud conocida y calculada. De esta forma alejando o acercando las paredes del bloque una distancia lineal de 0.09 mm por cada extremo, se permitió desarrollar un estado de esfuerzo a tensión o compresión en la superficie de contacto del bloque con el anillo, el cual es reproducido durante el ensayo con el apriete de un tornillo. Para ello fueron utilizados tornillos tipo allen avellanados de grado 8 (Probetas a tracción) y tornillos pasantes tipo allen de grado 8 (Probetas a compresión) con el fin de garantizar la resistencia y seguridad en la aplicación de los estados de esfuerzo.

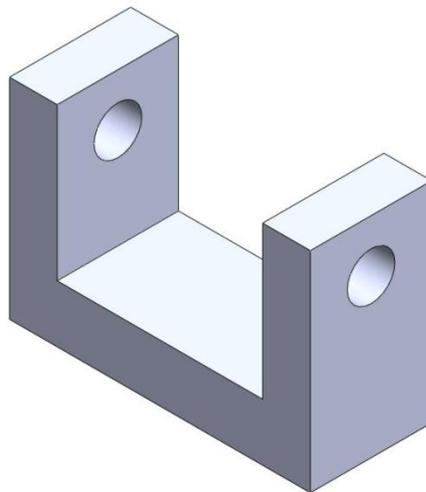


Figura 3.3 Representación del Bloque de Ensayo

Se fabricaron 19 bloques en total por cada acero donde 15 de ellos fueron utilizadas en la realización del ensayo de desgaste, 3 en el ensayo de dureza y las restantes fueron utilizadas en las pruebas para medir la deformación ocasionada a las probetas en el momento de aplicar carga. En total se utilizaron 57 probetas entre los tres aceros de estudio.

3.2.1.1 Mecanización del Bloque

El tocho de donde se construyeron los bloques presentaba una forma cilíndrica de sección transversal circular, este se secciono transversalmente en discos de 9 mm de espesor los cuales luego fueron llevados a medida según el plano de la probeta, refrentando ambas caras del disco hasta un espesor de 6,35 mm, todo este procedimiento se llevo a cabo en un Torno Horizontal Marca Boehringer tipo Gebr. Boehringer G.m.b.H con cuchilla de widia P2020H2. Una vez conformado estos discos se seccionaron en dirección longitudinal con una cortadora abrasiva Bueheler Samplmet 2. Las dimensiones finales se dieron con ayuda de una fresadora REMAC Modelo N° 936 donde se utilizo una fresa tipo bailarina de 8mm 4 cortes. Los orificios del espécimen fueron realizados con una mecha de 1/8 pulgada en un taladro radial UCIMU 81097, obteniendo una probeta de geometría similar a la ilustrada en la Figura 3.3.

3.2.2 Anillos

La mecanización de los anillos se realizó según lo establecido en la norma ASTM G 77 – 83. Se fabricaron 15 anillos por cada acero (AISI 4140, AISI Amutit y AISI D3) los fueron utilizados en la realización del ensayo. En total fueron mecanizados 45 anillos FALEX F-S10 (Ver Figura 3.4)

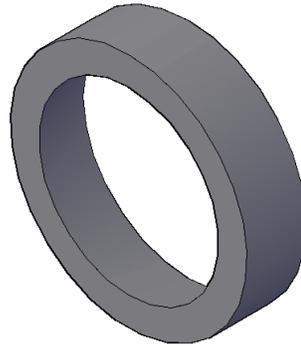


Figura 3.4 Representación del Anillo FALEX F-S10 de Ensayo.

3.2.2.1 Mecanización de los Anillos

Los anillos fueron mecanizados en las instalaciones pertenecientes al taller de mecanizado de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se utilizó un Torno Paralelo Colchester Student de 1 metro de bancada para el devastado inicial del tocho llevándolo a dos milímetros de diferencia de la dimensión final, esta operación se realizó a una velocidad de 288 R.P.M. Luego se utilizó un Torno Horizontal Marca Boehringer tipo Gebr. Boehringer G.m.b.H para la mecanización final de los especímenes llevándolos a las dimensiones dictadas por la norma, donde el acabado final se realizó con cuchilla de corte a 280 rpm, con pulitura por medio de lija sucesiva de 180 a 600 a una velocidad constante de 288 rpm durante este proceso.

Los anillos fueron trabajados por grupos según cada acero para garantizar uniformidad de dimensiones y acabado, además de evitar cualquier posible oxidación por prolongada exposición al medio ambiente.

3.3 Ensayo de Tracción

Los especímenes ensayados en función de determinar la resistencia a la tracción de cada uno de los materiales fueron elaborados en base a los parámetros fijados por la norma ASTM A370-03a, mecanizando especímenes de ensayo de sección circular proporcionales a la probeta estándar de ensayo (Ver *Figura 3.5.*), se realizaron ensayos bajo la norma ASTM E-8 que establece el método estándar para ensayos de tracción en materiales metálicos. Recopilados estos datos se aseguro un intervalo de operación en la zona elástica del material, en el momento de aplicar las cargas de tracción y compresión en el ensayo de desgaste, garantizado al establecer un estado de esfuerzo en el bloque que no superara el esfuerzo de fluencia de cada material.

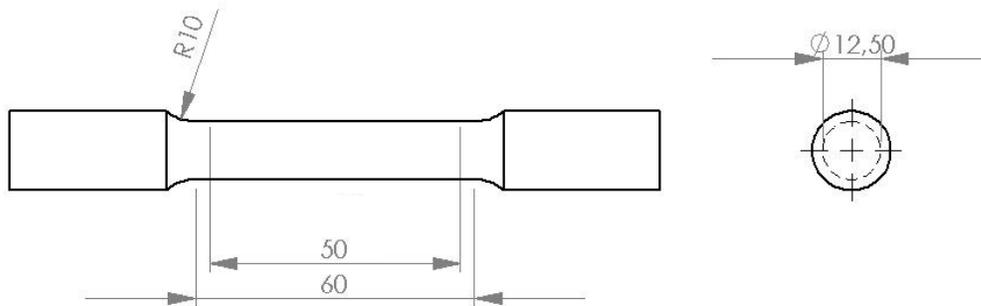


Figura 3.5 Geometría del Especímen para el Ensayo de Tracción. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm].

3.4 Ensayo de Dureza

Para la realización del ensayo de dureza primero se procedió a lijar la superficie de los bloques a ser penetradas por el indentador, para ello se le aplicó lijas de granulometría 120, 240, 320, 600 y 1200 progresivamente, en ese mismo orden y cumpliendo con su respectiva norma, luego de lijar completamente las superficies de los bloques se procedió a pulir cada una de las probetas hasta que

las superficies llegaran a un acabado especular. En las siguientes figuras se representan los equipos utilizado para la realización de estos procedimientos.



Figura 3.6 Equipo para lijar.



Figura 3.7 Equipo para pulir.

En el ensayo de dureza se utilizó un Durómetro marca Future Tech Corp FV-700 (Ver Figura 3.8) para medir Macro indentación. Para obtener la medición de la dureza se usó un penetrador de dureza Vickers, con una precarga de 30 Kgf, la duración de la indentación fue de 15 seg. La geometría del indentador o penetrador Vickers se puede apreciar en la figura 3.8. Para la realización de cada una de las indentaciones se cumplió con la norma ASTM E 92-82 que establece el método estándar para el ensayo de dureza Vickers en materiales metálicos.

También para el estudio de dureza se utilizó un Durómetro marca Bueler FV-700 (Ver Figura 3.9) para medir micro indentación. En este ensayo también se usó un indentador Vickers, con una precarga de 300 gr y 1000 gr, la duración de ambas cargas fue de 15 seg. Estos ensayos también se realizaron cumpliendo con la norma ASTM E 92-82.

Las ecuaciones que permiten obtener la dureza Vickers establecida según la norma ASTM E 92-82 están indicadas por las siguientes fórmulas.

$$HV = \frac{2 * P * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$HV = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

P : Carga [Kgf]

d : Diagonal principal de la huella impresa [m]

α : Ángulo entre caras del indentador (136°)



Figura 3.8 Durómetro marca Future Tech Corp FV-70.



Figura 3.9 Durómetro marca Buheler.

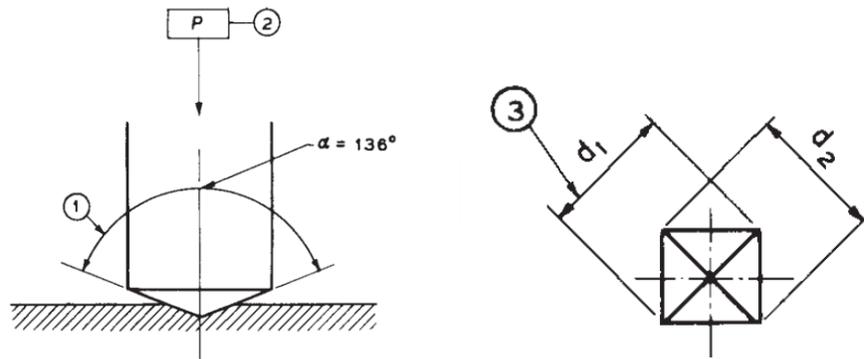


Figura 3.10 Geometría del Indentador o Penetrador.

Numero	Simbolo	Designación
1	...	Ángulo en el vértice del indentador piramidal (136°)
2	p	Carga de ensayo [Kgf]
3	d	Medida aritmética de las dos diagonales d1 y d2

Nota: Tabla y Figura tomadas de la Norma ASTM E92-82

Tabla 3.4. Símbolos y Designación asociados a la figura 3.10.

A continuación la **figura 3.11** muestra una representación de las superficies de los bloques a los cuales se les midió la dureza, las líneas rojas que se muestran en la figura son las líneas en las cuales se midió la dureza. La línea L1, L6 y L7 se midieron a una carga de 30 kg (Macro dureza), L2, L4 y L9 se midieron a 1 Kg (micro dureza) y L3, L5 y L8 a una carga de 0.3 Kg (micro dureza). La separación de cada indentación cumplió con la norma ASTM E 92-82. En cada línea de Macro dureza se hicieron 3 indentaciones para obtener un promedio representativo de dureza en esa línea, y en cada línea de micro dureza se hicieron 5 indentaciones las cuales también se promediaron, la razón de escoger este numero de indentaciones fue para cumplir con la norma.

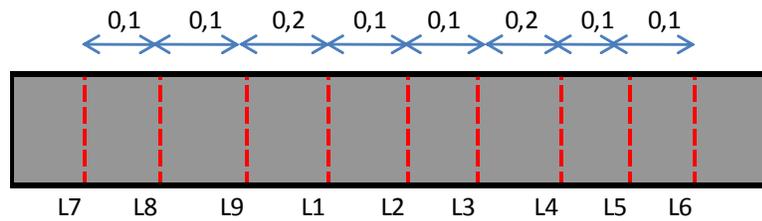


Figura 3.11 Representación de la superficie inferior del bloque al cual se le midió la dureza bajo los tres estados de estudio.

3.5 Simulación en ANSYS como Herramienta para determinar la distribución de los Estados de Esfuerzo en el diseño de la probeta.

Teniendo en cuenta el desplazamiento que tendrán las paredes de las probetas por efecto del tornillo, puede conocerse la distribución de los estados de esfuerzo generados en el bloque antes de la realización del ensayo y determinar en que momento algún punto de la probeta sobrepasa el límite de fluencia del material. De esta manera, haciendo uso del Programa Computacional basado en Elementos Finitos “ANSYS”, un software convencional de simulación y cálculo de esfuerzo, se podrá visualizar el comportamiento y distribución de esfuerzos en la superficie del bloque que estará en contacto con el anillo e identificar el punto donde se genera el máximo esfuerzo en el mismo, cuando la probeta esté sometida a un estado de tracción o compresión.

Simulando la geometría real de la probeta, se pasó a calcular el esfuerzo producido sobre la superficie que se encontraría en contacto con el anillo en el ensayo de desgaste y el máximo esfuerzo producido en el espécimen, variando la distancia inicial de separación entre las paredes de la probeta desde 0 mm hasta 0,2 mm con un paso de 0,05 mm por cada punto donde se reportó el valor de esfuerzo calculado.

3.6 Teorema de Castigliano como Herramienta para la Determinación de los Estados de Esfuerzo en el diseño de la probeta.

Utilizando el teorema de Castigliano para vigas en flexión pura (Ec. 1), se puede determinar el desplazamiento (δ) producto de la aplicación de una fuerza (P) en el punto (W).

$$\delta = \int_0^l \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P} dx \quad (\text{Ec. 3.3})$$

La función de energía de deformación es un escalar. Por tanto, las energías de deformación separadas, al igual que los desplazamientos debidos a ellas para los diferentes elementos de un sistema elástico, pueden sumarse algebraicamente.

Es por ello, estableciendo la generalización del bloque como elemento o partes de vigas, puede encontrarse el esfuerzo asociado en un punto producto de un desplazamiento establecido.

3.7 Determinación de la deformación elástica asociada a los desplazamientos de las paredes del bloque.

Se estima la deformación producida en régimen elástico de la superficie que se va a encontrar en contacto con el anillo en el ensayo de desgaste apoyándonos en los dispositivos de medición indirecta mediante resistencia eléctrica como son las galgas extensométricas. La fibra externa de la superficie será sometida a

una carga de compresión y tracción alargando o acortando la distancia de las paredes del espécimen, respectivamente. Los bloques utilizados tienen la misma configuración geométrica que los diseñados para la prueba de desgaste, tomando en cuenta que se tenía disponible una galga extensométrica se selecciono una única probeta de los tres materiales para realizar la prueba.

Como las deformaciones transversales en la superficie de la probeta son despreciables ya que las cargas de tracción y compresión se aplicaron en dirección longitudinal, se utilizó una galga unidireccional midiendo las deformaciones en dirección longitudinal y asumiendo que las deformaciones en las otras dos direcciones son cero, la galga extensométrica fue colocada en la superficie que se encontrara en contacto con el anillo lo que determino su tamaño en función del espacio donde se coloco. Gracias al rango de temperatura al que se iba a exponer la galga durante el ensayo se determino que no era necesaria compensación por efecto de la temperatura por tal razón se conecto la galga a un cuarto de puente sin compensación.

Las mediciones de las deformaciones se realizaron primero sometiendo la probeta a distintas cargas de tracción en sus paredes produciendo que la distancias entre ellas fuese aumentando a medida que se aumentaba la carga, provocando así una carga de compresión en la fibra que se encontraría en contacto con el anillo en el ensayo de desgaste. Las mediciones de las deformaciones fueron tomadas variando la distancia inicial entre las paredes una cantidad de 0,05 mm, 0,1 mm, 0,15 mm, 0,18 mm. Esta toma de datos fue ejecutada de la misma manera aplicando cargas de compresión a las paredes de la probeta lo que causaba una disminución entre la distancia que las separa y a su vez ocasionaba cargas de tracción en la superficie que se encontraría en contacto con el anillo en el ensayo desgaste.



Figura 3.12. Montaje donde se realizo la medición con las galgas.

3.7.1 Equipo de medición

El equipo utilizado para la medición fue transductor marca Vishay instruments modelo P-350A, utilizando como fuente de poder 8 baterías de 1,5 voltios marca energizer.



Figura 3.13. Strain Indicator marca Vishay instruments modelo P-350A



Figura 3.14. Conexión de la galga al transductor para un cuarto de puente sin compensación

La galga utilizada para esta prueba tiene las siguientes especificaciones:

Tipo	Resistencia Ω	Factor de galga	Longitud de la galga [mm]
Unidireccional	350 \pm 1 Ohmio	3,18 \pm 1%	3,16

Tabla 3.5. Especificaciones de la galga.

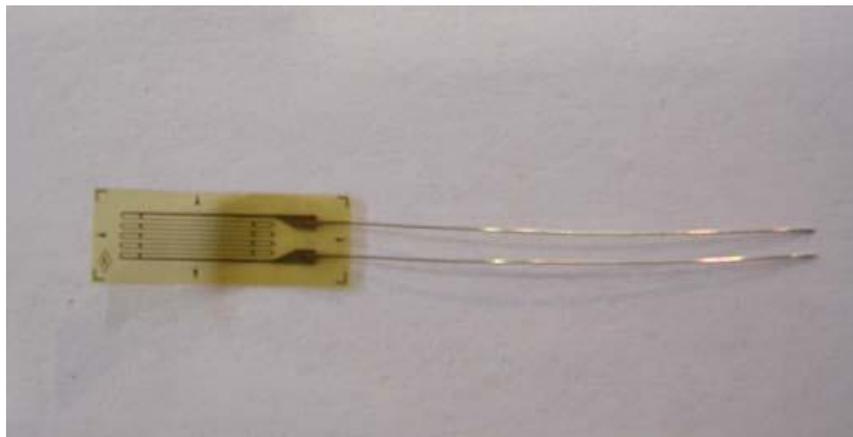


Figura 3.15. Figura de una galga unidireccional.

Habiendo escogido la tipología de las galgas a emplear en esta campaña, lo siguiente que se realizó fue escoger el tipo de adhesivo, para lo cual se

tomo en cuenta las prescripciones de las galgas que recomendaban el uso de pegamento epóxico.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para el pegado de las galgas:

- Se limpio la superficie de la probeta en la que se iba a situar la galga aplicando un desengrasante que no reaccione con el material a ensayar.
- Se pulió la superficie con distintos papeles de lija aumentando progresivamente su granulometría, pasando por 120, 240, 360, 500, 600., lo que permitió desaparecer las irregularidades, poros y rastros de oxido que se encontraba en ella, limpiando luego la superficie con alcohol. Esta operación de pulido se realizo en una dirección de 45° con respecto de la dirección de la medida de la banda.
- Se trazaron con un lápiz los ejes de posicionamiento de la galga de tal manera que el centro de la misma coincidiera con el centro de la superficie y se limpio la superficie por última vez pasando un algodón con alcohol.
- Se coloco la galga cara arriba sobre una superficie previamente limpiada con alcohol, posteriormente se aplico cinta adhesiva sobre la galga y se desprendió cuidadosamente la cinta con un ángulo de 30° respecto la superficie comenzando por el lado contrario a los terminales de la galga por último se limpio el reverso de la misma con un algodón algo humedecido con alcohol.
- Se pego la cinta adhesiva que tenia la galga adherida a la superficie a ensayar haciendo coincidir las guías de la galga con las hechas anteriormente sobre la superficie. Se levanto un extremo de la cinta adhesiva con un inclinación de 30° con respecto a la superficie

comenzando por el lado contrario a los terminales de la galga dejando el otro extremo de la cinta pegada a la superficie.

- Se agrega algo de pegamento a la cara del espécimen cubriendo el área que será abarcada por la probeta y se presiono con un algodón el conjunto adhesivo-galga contra la superficie empezando por el extremo que se encontraba adherido a la cara de la probeta y realizando un barrido hasta pegar toda la cinta adhesiva. Inmediatamente se hizo presión con el pulgar sobre la galga por un (1) minuto para asegurarse que toda la superficie quedara adherida uniformemente. Se esperaron dos(2) minutos para quitar la cinta adhesiva en forma tangente empezando por el extremo contrario a los terminales de la galga.
- Se prepararon los terminales de las galgas soldando con estaño los cables que iban al equipo de medición y luego se reviso la continuidad en el circuito de la galga. Por último se cubrió la galga con una delgada película de esmalte.

Una vez se midieron las deformaciones producidas por efecto de la carga sobre el espécimen se calcularon los esfuerzos asociados a dichas deformaciones apoyándonos en relaciones constitutivas. Como nos encontramos en un caso de deformación plana (*Figura 3.18*) donde la carga aplicada al sistema se da en una sola dirección (longitudinal), generando únicamente un esfuerzo normal asociado a esta dirección.

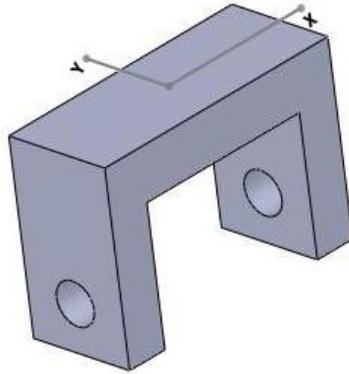


Figura 3.16. Superficie de la probeta con la dirección de los ejes utilizada.

En base a lo anterior se realizaron las simplificaciones de la relación constitutiva asociada para el caso, de la siguiente manera

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu * \frac{\sigma_y}{E} \quad \text{Ec. (3.4)}$$

Donde,

ε_x : Deformación en la dirección (x)

σ_x : Esfuerzo normal en la dirección (x)

σ_y : Esfuerzo normal en la dirección (y)

ν : Modulo de poisson del material

E : Modulo de young del material

Siendo cero el esfuerzo normal asociado a la dirección (y) σ_y , por no haber carga aplicada en esa dirección sobre el espécimen, despejamos el esfuerzo normal asociado a la dirección (x) σ_x ,

$$\sigma_x = \varepsilon_x * E \quad \text{Ec.(3.5)}$$

3.8 Ensayo Bloque sobre Anillo

Antes de la realización del ensayo se establecieron los parámetros para llevar a cabo el estudio, se tomo en cuenta que los pares tribológicos utilizados fueron metales idénticos llevándonos a asumir que el tipo de desgaste a producirse en el proceso es por adhesión, gracias a esta característica del ensayo y que este será realizado sin presencia de lubricante alguno se selecciono un coeficiente de desgaste adimensional adecuado para tales condiciones según Roberth L. Norton Primera edición 1999, Diseño de Maquinas.

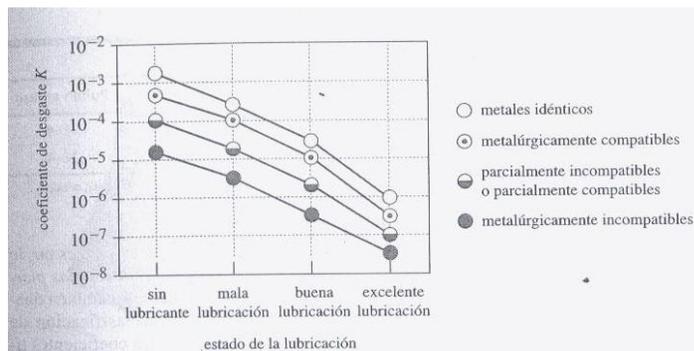


Figura 3.17 Coeficiente de desgaste K vs estado de lubricación, mecanismo de desgaste adhesivo
(Roberth L. Norton Primera edición 1999, Diseño de Maquinas)

Teniendo en cuenta que se realizaran pruebas manteniendo en contacto metales idénticos y sin ninguna lubricación para cada material, se tomo $3,5 \times 10^{-3}$ como coeficiente adimensional de desgaste por adhesión (K) para los tres materiales. De esta manera se calculo el coeficiente dimensional de desgaste por adhesión (k) para cada acero según la ecuación:

$$k = \frac{K}{H} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

Resultando,

Material	k (mm³/N*m)
AISI O1	1,79E-03
AISI 4140	1,06E-03
AISI D3	1,47E-03

Tabla 3.6. Coeficiente dimensional de desgaste para cada acero.

Para fijar los parámetros de funcionamiento del ensayo se debieron fijar factores geométricos limitantes llevándonos a fijar una profundidad máxima de desgaste (d) de 1,5 mm, medidos desde la cara superior de la probeta (**Figura 3.16**), lo que nos permitió calcular el volumen teórico máximo de 90,8145 mm³ (Anexo A).

Ahora bien, teniendo como referencia el volumen de teórico máximo que se puede alcanzar en el ensayo, se trabajó dentro de un intervalo de presiones normales (establecido por el mapa de mecanismos de desgaste) y se asumieron variaciones de la distancia recorrida como uno de los parámetros del ensayo, para la determinación del volumen de desgaste teórico calculado mediante la fórmula de Archard. Además de esto se detalló el aumento del área de contacto entre el bloque y el anillo ya que esto produjo una disminución progresiva de la presión en el contacto del par tribológico a medida que transcurría la prueba.

La velocidad de rotación fue escogida tomando en consideración aquella que permitiera el mayor rango de presiones dentro de la zona de operación de maquinas, seleccionando así 0,1832 m/s como velocidad lineal en el mapa de mecanismo de desgaste, la que tomando en cuenta el radio del anillo equivale a una velocidad de rotación de 100 RPM.

En éste sentido, se seleccionó una combinación entre carga y distancia recorrida dentro de las posibles combinaciones que se ajustara a un volumen significativo de desgaste tanto para el acero AISI 4140 como para el acero AISI D3 y el acero AISI O1, sin sobrepasar al volumen geométrico límite de desgaste ($90,8145 \text{ mm}^3$) y ajustado a una carga que fuera medible sin problemas por las pesas disponibles en el laboratorio. Los cálculos respectivos pueden ser consultados en el Anexo C, D y E

Las pesas disponibles en la Máquina Falex para la simulación de la Carga Normal aplicada: 2 de 20 Lbf, 2 de 10 Lbf, 1 de 5 Lbf, 5 de 2 Lbf, 5 de 1 Lbf, 1 de $\frac{1}{4}$ Lbf, 1 de $\frac{1}{2}$ Lbf, 1 de 100 gr, 1 de 250 gr, 1 de 500 gr.

Teniendo en cuenta el Mapa general de Mecanismos de Desgaste para aceros en contacto relativo sin lubricación desarrollado por Williams (1999), se trabajó en el rango de velocidades de la zona de operación de máquinas como lo ilustra la **Figura 3.18**.

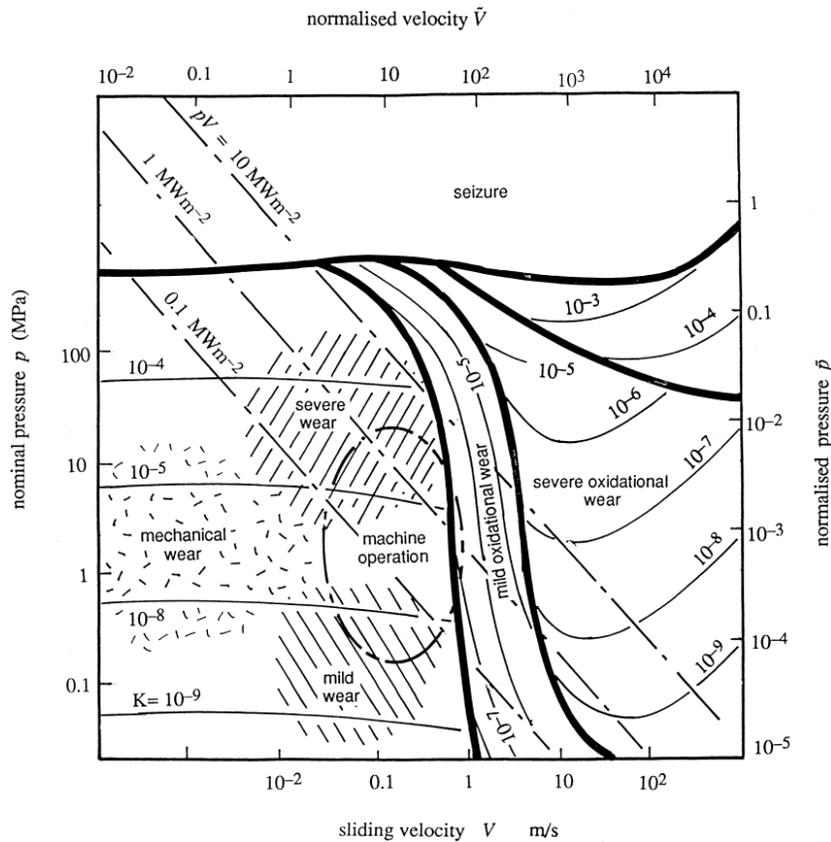


Figura 3.18. Mapa de Mecanismos de Desgaste. Tomado de Wear modeling: analytical, computacional and mapping: a continuum mechanics approach, por Williams, 1999, Cambridge University Engineering Department.

De ésta manera, los valores seleccionados de carga (W) y distancia recorrida en el ensayo para una profundidad máxima de desgaste de 1,5 mm, que corresponde a un volumen permisible de desgaste de $90,8145 \text{ mm}^3$ para cada material fueron de:

Acero AISI	Carga (Lbf)	Longitud recorrida (m)
O1	25	457
4140	25	772
D3	25	556

Tabla 3.7 Valores de carga y distancia recorrida para cada material.

Como el brazo del equipo hace que la magnitud de la carga nominal aplicada aumente 10 veces su magnitud, entonces la Carga neta (W_n) aplicada es:

$$W_n = \frac{W_{teorica}}{10} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

$$W_n = \frac{25}{10} \rightarrow W_n = 2,5 \text{ Lbf}$$

El tiempo destinado para cada uno de los ensayos se calculo tomando en cuenta la velocidad lineal seleccionada y la distancia recorrida por los especímenes correspondientes a cada material:

$$T = \frac{D}{V} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Material	Tiempo de ensayo (min)
AISI O1	41,6
AISI 4140	70,2
AISI D3	50,6

Tabla 3.8. Tiempo de duración del ensayo para cada material.

Variables de Operación para el Ensayo Bloque sobre Anillo

Variable	Unidad	Magnitud
Carga aplicada (W_n)	[Lbf]	2,5
Revoluciones (RPM)	[rev/min]	100

Tabla 3.9. Variables de operación en común para los materiales utilizados.

Material	Duración del Ensayo [min]	Distancia de Deslizamiento [m]	Coeficiente Dimensional
AISI O1	26,7	457	1,79E-03
AISI 4140	37,6	772	1,06E-03
AISI D3	27,1	553	1,47E-03

Tabla 3.10. Variables de operación particulares entre los materiales.

Se prestó gran atención al área inicial de contacto por ser la menor a lo largo del ensayo y donde se produjo la mayor presión. Esta superficie inicial de contacto entre el conjunto bloque-anillo y la presión máxima producida en el ensayo fue calculada mediante teoría de contacto hertziana para un sistema estático, modelando el tipo de contacto entre el par tribológico al producido entre dos cilindros uno de ellos con radio infinito que corresponde con la superficie plana del bloque. La distribución de presiones en la zona describe una superficie con forma de cilindro elíptico y una huella de contacto rectangular (Anexo B).

Consecuencia de la disminución del área se produjo un descenso considerable de la presión, lo que nos llevo a calcular la presión mínima generada en el ensayo, la cual coincide con el final de la prueba gracias a que en este punto se genera la mayor área de contacto entre el par tribológico, según lo fijado anteriormente el final del ensayo se alcanza cuando la profundidad de desgaste es 1,5 mm (Anexo B).

3.8.1 Limpieza de las Probetas

Para cumplir con las condiciones óptimas del ensayo de desgaste las probetas antes de ser ensayadas fueron sometidas a una limpieza para eliminar las formaciones de incipientes de óxidos y cualquier grasa o agente externo que se halla adherido a las probetas. Para esta limpieza fue usado un Limpiador Ultrasonido marca Buehler Modelos ULTRAMER II que se encuentra en la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela. Para limpiar las probetas completamente se llevo un tiempo de 5 minutos. Este procedimiento de limpieza se realizo antes de realizar el ensayo bloque sobre anillo y luego de la culminación de dicho ensayo. La **Figura 3.19** muestra el limpiador Ultrasónico utilizado en el laboratorio y la **Figura 3.20** muestra los recipientes a las cuales se introdujeron las probetas.



Figura 3.19 Limpiador Ultrasónico



Figura 3.20 Limpieza de Bloques y Anillos.

Luego de culminado este proceso de limpieza todas las probetas fueron manipuladas con guantes quirúrgicos de manera de evitar que a las probetas fueran contaminadas o que se le adherirá cualquier tipo de grasa, aceite, oxido o agentes externos a las superficies de la probeta ya que esto podría afectar a los resultados de los ensayos. Para la realización de la limpieza de cada uno de lo ensayos garantizamos que fueran llevados bajos las mismas condiciones.

3.8.2 Pesaje de las Probetas

Para poder observar la influencia de los estados de esfuerzo en los tres materiales estudiados (AISI 4140, AISI O1 Y AISI D3) se realizó una comparación en cuanto al desgaste entre las probetas sometidas a esfuerzos en tensión, compresión debido al apriete de los tornillos y las probetas que no estaban sometidas a nada, para ello se peso cada par tribológico de cada material, esto se hizo una vez que se limpio y seco cada par. La medición del peso en los pares tribológicos se realizó antes y después del ensayo de desgaste en cada uno de los pares tribológicos, para así calcular el peso perdido debido al desgaste. La información del peso perdido se obtuvo usando una Balanza marca Scientech, modelo SA 310 de precisión 0.0001 gr que se encuentra en la Facultad de Farmacia de la U.C.V. Esta es una balanza que nos permite aislar y confinar las probetas para así evitarse cualquier tipo de perturbaciones que pueda ocasionar el ente externo, con esto nos vitamos modificaciones a la lectura dada por la balanza. La *Figura 3.21* muestra la balanza antes mencionada que se encuentra en el laboratorio.



Figura 3.21 Balanza Analítica Scientech

3.8.3 Procedimiento del ensayo Bloque sobre anillo

El tribómetro utilizado para el ensayo es una máquina FALEX Alfa LFW-1 (configuración Bloque sobre Anillo o “Block on Ring”) donde podemos identificar sus partes como lo muestra la *Figura 3.22*. La interacción bloque anillo se lleva a cabo en la ausencia de lubricante, en aire. A continuación se indica el procedimiento para el encendido de la máquina posterior a las modificaciones y calibración hechas por Scagni y E. Lujan de la máquina FALEX, máquina de ensayo para fricción y desgaste.

Indicadores y partes de la máquina de ensayo FALEX

A. Interruptor

B. Contador mecánico de tiempo de funcionamiento
(h)

- | | |
|---|--|
| C. Selector de velocidad de rotación del eje | I. Indicador digital de la fuerza de roce (Libras) |
| D. Contador digital de ciclos | J. Cámara de ensayo |
| E. Controlador e indicador de la Temperatura del baño de aceite | K. Cavidad para el alojamiento de los bloques |
| F. Indicador digital de las rpm | L. Eje cónico para el alojamiento del anillo |
| G. Indicador digital de la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) | M. Soporte para alojar las pesas |
| H. Interruptor automático de la fuerza de roce | N. Brazo palanca |
| | O. Llave de drenaje para la limpieza de la cámara |

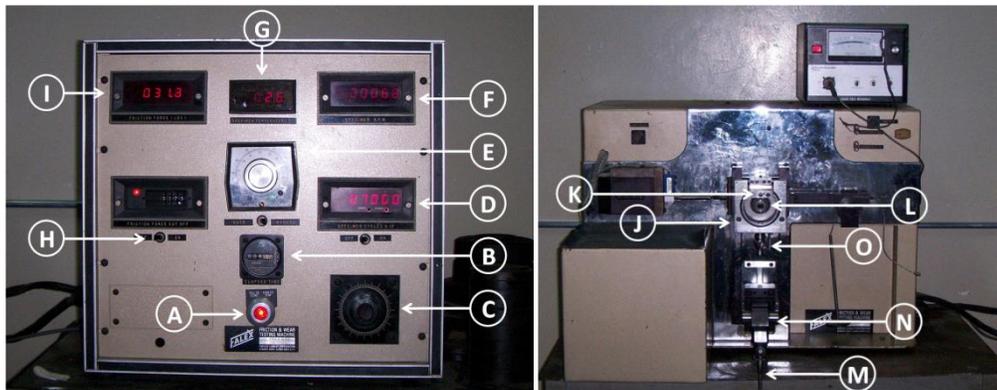


Figura 3.22 Máquina de Ensayo FALEX Alfa LFW-1

Procedimiento de encendido y puesta en marcha:

1. Pasar el braker para alimentar la entrada del sistema eléctrico de la máquina

2. Pasar el interruptor en el lado lateral de la máquina y colocarlo en la posición ON
3. Retirar el botón central del equipo en la parte frontal del mismo (Pull to Start/Pull to Stop)
4. Realizar la limpieza, sacado y pesaje tanto del bloque como del anillo a ensayar.
5. Una vez colocada las probetas, tanto el anillo como el bloque sujetos y alineados, con el apriete del anillo indicando las 100 lbf y la carga normal de trabajo, se procede a la puesta en marcha de la máquina.
6. Se fija en el panel frontal de la máquina la cantidad de RPM de trabajo girando la perilla en el tablero de control. El indicador digital ubicado en la parte superior sobre la misma perilla nos permitirá establecer las RPM de trabajo.
7. Iniciado el ensayo, observar que las probetas estén en contacto bajo la acción de la carga.
8. Una vez alcanzado el tiempo, los ciclos de trabajo o la distancia de deslizamiento, se procede a detener el equipo. Para ello se gira la perilla de los RPM en el sentido opuesto a la aplicación de los mismos hasta llevar la marca a cero, confirmando por el indicador digital la presencia de 0 rpm. No es imperativo hacer el paro del ensayo con el interruptor automático o manual de ciclos.
9. Una vez hecho esto, se retira la carga normal aplicada por las pesas, se retiran bloque y anillo de sus respectivas mordazas.
10. Remover cualquier viruta sobre las probetas sin modificar la superficie y seguidamente pesar las probetas desgastadas para determinar la pérdida de masa en cada uno.
11. Tomar otro par tribológico y repetir el procedimiento desde el paso Nro. 4.

3.9 Medición del Volumen Desgastado

El volumen desgastado en cada uno de los pares tribológicos ensayados pudo ser estimado mediante la diferencia de masa antes y después del ensayo, dividida a su vez entre la densidad respectiva de cada acero. De ésta manera el volumen desgastado está definido mediante:

$$VD = \frac{\Delta m}{\rho} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

Donde:

VD : Es el Volumen de desgaste [mm^3]

Δm : Es la diferencia de masa antes y después del ensayo [g]

ρ : Es la densidad respectiva del acero [g/mm^3] ($7,85 * 10^{-3} \text{ g}/\text{mm}^3$)

Así también, la rata de desgaste definida por la cantidad de volumen desgastado por unidad de tiempo o por unidad de distancia recorrida es establecida mediante:

$$TD = \frac{VD}{t} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Donde:

TD : Es la rata de desgaste por unidad de tiempo [mm^3/seg]

t : Es el tiempo [seg]

3.10 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Una vez realizado la medición del volumen desgastado en los especímenes, se seleccionaron tres muestras de uno de los materiales las cuales estaban caracterizadas por haber sido sometidas en el ensayo de desgaste a un estado de carga distinto entre ellas.

Una vez seleccionado los especímenes la superficie de desgaste fue evaluada mediante un microscopio electrónico de barrido marca Hitachi, modelo S-2400 (*Figura 3.23*) con capacidad para ampliaciones de hasta 300.000x y acoplado a un equipo de espectroscopia por dispersión de energía de rayos X.



Figura 3.23. Microscopio Electrónico de Barrido marca Hitachi S-2400.

Las muestras seleccionadas para la realización de la microscopia electrónica de barrido fueron las que presentaron comportamiento en común con el resto de los especímenes ensayados en la prueba de desgaste.

Capítulo IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS.

4.1. Ensayo de Tracción

Los resultados obtenidos en los ensayos de tracción fueron los siguientes,

Material	Resistencia a la Fluencia [Mpa]
AISI O1	699
AISI 4140	661
AISI D3	532

Tabla 4.1 Resistencia a la fluencia

Se asumió el mismo modulo de elasticidad para los tres materiales de 207 GPa por ser un valor representativo de esta propiedad encontrado en la literatura para los tres materiales trabajados.

Se pudo determinar que para tales aceros la resistencia a la fluencia obtenido experimentalmente (*Tabla 4.1*) presentan un incremento aproximado de 9%, 1% y 6% del esfuerzo real conocido en estado recocido para los aceros AISI O1, AISI 4140 y AISI D3, respectivamente.

De los valores obtenidos del punto de fluencia para los distintos materiales, el acero AISI D3 reporta la menor magnitud, por lo que se tomó este valor como punto de referencia a la hora de decidir cuál sería el desplazamiento máximo al

que se someterían las paredes de la probeta sin sobrepasarnos del límite de fluencia.

4.2 Determinación y Simulación del Estado de Esfuerzo Aplicado en el Bloque de Ensayo.

4.2.1 Aplicación del Programa Computacional “ANSYS” para la determinación de los esfuerzos

Los resultados obtenidos mediante el programa computacional “ANSYS” bajo las condiciones de desplazamiento fijadas fueron los siguientes.

Para cada una de las simulaciones a continuación, la variación de la magnitud en la distribución de los esfuerzos varía gradualmente, tanto como varía la escala de colores.

Podemos visualizar en la *Figura 4.1* la distribución de los estados de esfuerzo a tensión cuando el apriete del tornillo produce un acercamiento de las paredes de la probeta.

De igual forma, en la *Figura 4.2* podemos visualizar la distribución de los estados de esfuerzo a compresión cuando el apriete del tornillo produce una separación de las paredes de la probeta.

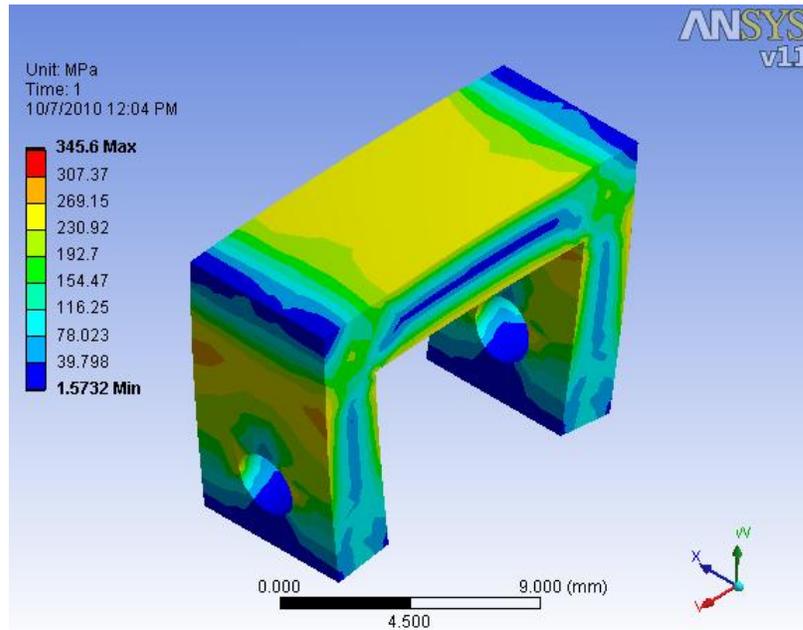


Figura 4.1 Simulación de los Estados de Esfuerzo cuando el Bloque es sometido a Tracción

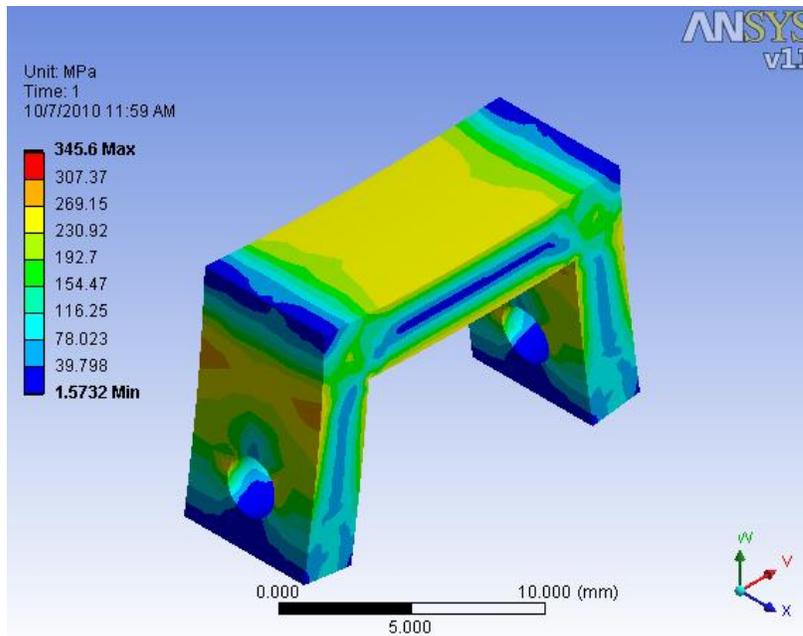


Figura 4.2 Simulación de los Estados de Esfuerzo cuando el Bloque es sometido a compresión.

Los esfuerzos producidos en la zona de contacto del par tribológico son,

Desplazamiento [mm]	Deformación [mm/mm]	Esfuerzo [Mpa]
0,05	3,19E-04	66
0,1	6,38E-04	132
0,15	9,61E-04	199
0,18	1,16E-03	240
0,2	1,28E-03	265

Tabla 4.2 Esfuerzo asociados a las deformaciones producidas en el ensayo

No se pudo alcanzar este valor máximo de desplazamiento en la realidad producto de que se averiaban las llaves utilizadas. Dichas llaves permitieron ejercer un desplazamiento máximo de 0,18 mm por lo que fue seleccionada esta magnitud para ser aplicada durante el ensayo de desgaste.

Desplazamiento (mm)	Esfuerzo en la zona de contacto (MPa)
0,18	240

Tabla 4.3 Desplazamiento utilizado en el ensayo de desgaste y su esfuerzo asociado

4.2.2 Galgas Extensométricas

Se muestran en la tabla 4.2 las deformaciones obtenidas mediante el uso de galgas extensométricas en el bloque utilizado en el ensayo de desgaste, las deformaciones fueron medidas aplicando cargas tanto a tracción como de compresión tomando en cuenta que el esfuerzo ejercido estuviese por debajo del límite de fluencia.

Desplazamiento [mm]	Deformación	
	Tracción [m/m]	Compresión [m/m]
0,05	3,24E-04	3,14E-04
0,1	6,50E-04	6,33E-04
0,15	9,83E-04	9,47E-04
0,18	1,19E-03	1,15E-03

Tabla 4.4 Deformaciones producidas por los desplazamientos aplicados a las paredes del espécimen.

Dichas deformaciones tienen asociados esfuerzos que fueron calculados según relaciones constitutivas.

$$\sigma_x = \varepsilon_x * E \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde,

ε_x : Deformación de la probeta al aplicar un desplazamiento entre las paredes

σ_x : Esfuerzo normal en la dirección (x)

E: Módulo de young del material

$$\sigma_x = 1,19 \times 10^{-3} * 207 \times 10^9 = 246 \text{ MPa}$$

Resultando los siguientes valores para cada una de los desplazamientos fijados entre las paredes del espécimen,

Desplazamiento [mm]	Esfuerzo	
	Tracción [MPa]	Compresión [MPa]
0,05	67	65
0,1	135	131
0,15	204	196
0,18	246	238

Tabla 4.5 Esfuerzos asociados a las deformaciones producidas en el espécimen.

Se nota una leve diferencia entre los valores de esfuerzos calculados a compresión y tracción, lo que se debe a la misma naturaleza de los ensayos experimentales y la dificultad para reproducir exactamente las mismas condiciones entre cada prueba, de igual manera se seguirá trabajando con esta diferencia presentada por lo esfuerzos haciendo referencia a cada uno de los estados de carga aplicados al momento de hacer cualquier calculo posterior.

Se puede identificar una tendencia lineal bien marcada en el comportamiento de los resultados lo cual es satisfactorio en función de las características que presentan los aceros en su rango elástico, logrando obtener un valor máximo de esfuerzo a tracción de 246 MPa que representa un 35%, 37% y 46% del valor del punto de fluencia de los aceros AISI O1, AISI 4140 y AISI D3 respectivamente, de la misma forma se obtuvo un valor máximo de esfuerzo a compresión de 235 Mpa que representa un 34%, 36% y 45% del valor del punto de fluencia de los aceros AISI O1, AISI 4140 y AISI D3 respectivamente, lo que evidencia la aplicación de un esfuerzo considerable dentro de la zona elástica para la evaluación de la influencia de los estados de esfuerzo en el volumen de desgaste.

Los otros dos métodos alternativos para el cálculo de los esfuerzos producidos en el espécimen arrojaron los siguientes resultados,

4.2.3 Método de Castigliano

4.2.3.1 Cálculo de Esfuerzo para el Bloque sometido a Tracción

Recordando la *Ecuación 4.2* que hace referencia al del teorema de Castigliano aplicado en vigas y haciendo el estudio de la mitad del bloque (por simetría),

podemos encontrar cuanto es el esfuerzo aplicado al establecer desplazamientos arbitrarios en el punto de aplicación de la carga

$$\delta = \int_0^l \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial P} dx \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Teniendo en cuenta inicialmente la mitad de la probeta, como se muestra en la **Figura 4.3**, se puede realizar una generalización para el cálculo del esfuerzo generado en el punto más esforzado sobre la superficie en contacto durante el ensayo. De ésta manera, teniendo en cuenta el teorema de Castigliano, la geometría inicial de estudio es dividida en dos secciones para simplificar los cálculos, como lo ilustra la **Figura 4.4**. Donde: P es la carga aplicada en la pared de la probeta, I y II es la referencia a cada sección donde se realizará el estudio de equilibrio y posterior aplicación del teorema de Castigliano.

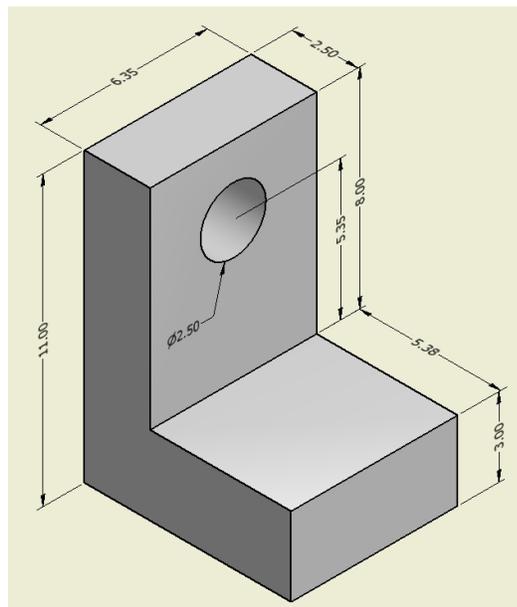


Figura 4.3 Geometría del bloque de ensayo seccionado a la mitad. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm]

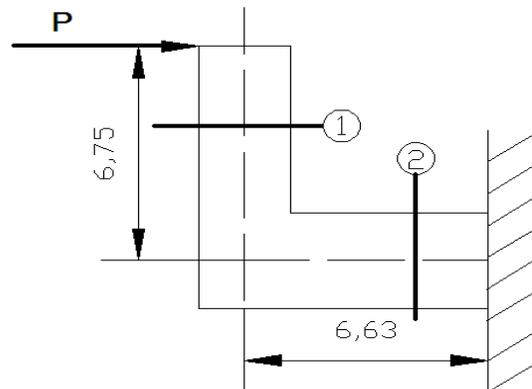


Figura 4.4 Diagrama de cuerpo libre de la geometría generalizada del bloque sometido a tensión, para el cálculo del esfuerzo a través del teorema de Castigliano. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm].

Así obtenemos la primera (**Figura 4.5**) de las dos secciones mencionadas anteriormente.

Donde:

P : Es la carga aplicada en la pared de la probeta

V_{x1} : Es la fuerza horizontal generada al retirar el vínculo.

V_{y1} : Es la fuerza vertical generada al retirar el vínculo.

M_{o1} : Es el momento generado al retirar el vínculo.

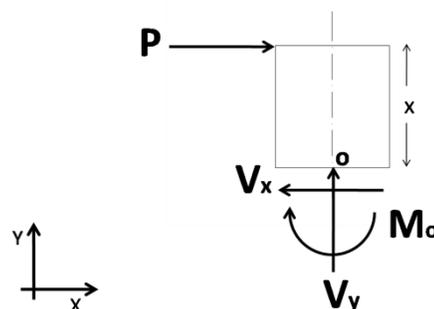


Figura 4.5 Diagrama de Cuerpo Libre de la Sección 1 en el bloque sometido a tensión.

Estudiando el equilibrio del cuerpo en dos dimensiones se tiene que:

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0 & \sum F_y &= 0 & \sum M_o &= 0 \\ P - V_{x1} &= 0 & V_{y1} &= 0 & -M_{o1} - Px &= 0 \\ V_{x1} &= P & & & M_{o1} &= -Px \\ & & & & \frac{\partial M_{o1}}{\partial P} &= -x \end{aligned}$$

De igual forma, el Diagrama de Cuerpo Libre de la segunda sección (**Figura 4.6**)

Donde:

P : Es la carga aplicada en la pared de la probeta.

V_{x2} : Es la fuerza horizontal generada al retirar el vínculo.

V_{y2} : Es la fuerza vertical generada al retirar el vínculo.

M_{o2} : Es el momento generado al retirar el vínculo.

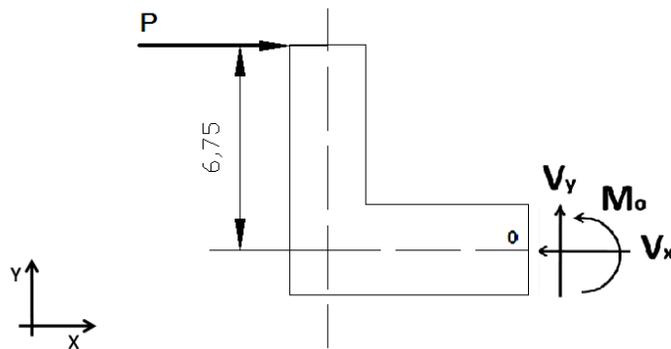


Figura 4.6 Diagrama de Cuerpo Libre de la Sección 2 en el bloque sometido a tensión. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm].

Donde el respectivo estudio de equilibrio es:

$$\sum F_x = 0$$

$$P - V_{x2} = 0$$

$$V_{x2} = P$$

$$\sum F_y = 0$$

$$V_{y2} = 0$$

$$\sum M_o = 0$$

$$M_{o2} - \frac{4,3125}{1000} P = 0$$

$$M_{o2} = \frac{4,3125}{1000} P$$

$$\frac{\partial M_{o2}}{\partial P} = \frac{4,3125}{1000}$$

Seguidamente, aplicando el teorema de Castigliano para cada sección se obtiene:

Para la sección 1, aplicando la **Ecuación 4.2**:

$$\delta_1 = \int_0^l \frac{M_1}{EI_1} \frac{\partial M_1}{\partial P} dx$$

$$\delta_1 = \int_0^{6.75/1000} \frac{-Px}{EI_1} * -x dx$$

$$\delta_1 = \int_0^{6.75/1000} \frac{Px^2}{EI_1} dx$$

Donde la inercia y dimensiones de la sección son:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

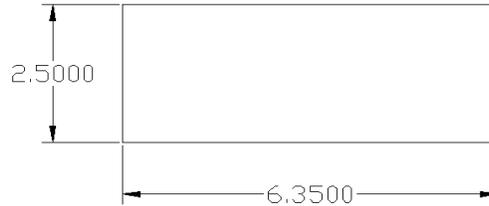


Figura 4.7 Sección transversal 1. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm]

Por lo tanto,

$$I_1 = \frac{1}{12} * \frac{6,3500}{1000} m * \left(\frac{2,5000}{1000} m \right)^3$$

$$I_1 = 8,26 * 10^{-12} m^4$$

Introduciendo los valores de I_1 y de $E = 207 \text{ GPa}$ (módulo de elasticidad del acero) en la integral anterior, se obtiene que:

$$\delta_1 = \frac{P}{207 * 10^9 * 8,26 * 10^{-12}} \int_0^{6,75/1000} x^2 dx$$

Los valores de E , P e I salen de la integral como constantes al no depender ellos del valor de x . Al integrar la expresión con respecto a x

$$\delta_1 = \frac{P}{207 * 10^9 * 8,26 * 10^{-12}} * \frac{x^3}{3} \Big|_0^{6,75/1000}$$

Y evaluando los límites superior e inferior de la integral, se obtiene que:

$$\delta_1 = \frac{P}{207 * 10^9 * 8,26 * 10^{-12} * 3} * \left(\left(\frac{6.75}{1000} \right)^3 - 0^3 \right)$$

$$\delta_1 = 5,989 * 10^{-8} P$$

Para la sección 2, de la *Ecuación 4.2*:

$$\delta_2 = \int_0^l \frac{M_2}{EI_2} \frac{\partial M_2}{\partial P} dx$$

$$\delta_2 = \int_0^{6,6300/1000} \frac{1}{EI_2} * \frac{6.75P}{1000} * \frac{6.75}{1000} dx$$

$$\delta_2 = \left(\frac{6.75}{1000} \right)^2 * \frac{P}{207 * 10^9} \int_0^{6,6300/1000} \frac{dx}{I_2}$$

$$I_2 = \frac{1}{12} * b * h^3$$

$$I_2 = \frac{1}{12} * \frac{6.35}{1000} * \left(\frac{3}{1000} \right)^3$$

$$I_2 = 1.428 * 11 * 10^{-11}$$

$$\delta_2 = \left(\frac{6.75}{1000} \right)^2 * \frac{P}{207 * 10^9 * 1.428 * 10^{-11}} * \frac{6.63}{1000}$$

$$\delta_2 = 1.02 * 10^{-7} P$$

Donde el desplazamiento total (δ_t) la suma de los dos desplazamientos δ_1 y δ_2 anteriormente calculados.

$$\delta_t = \delta_1 + \delta_2 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Siendo $\delta_t = 6.4 * 10^{-5}m$ en el caso de las probetas sometidas a tracción.

$$6.4 * 10^{-5}m = 5,989 * 10^{-8}P + 1.02 * 10^{-7}P$$

Despejando P de la expresión anterior se obtiene:

$$P = 394.64 N$$

Una vez conseguido el valor de P , se calculan las reacciones V_x , V_y y M_o en el punto O , suponiendo un empotramiento de la geometría generalizada del bloque en estudio. (Ver Figura 4.8 y Figura 4.9 respectivamente).

Donde:

P : Es la carga aplicada en la pared de la probeta.

V_x : Es la fuerza horizontal generada al retirar el vínculo.

V_y : Es la fuerza vertical generada al retirar el vínculo.

M_o : Es el Momento Flector en el punto O .

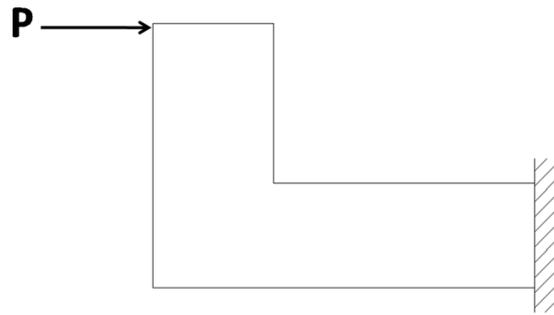


Figura 4.8 Diagrama de cuerpo libre de la geometría generalizada del bloque sometido a tensión con empotramiento.

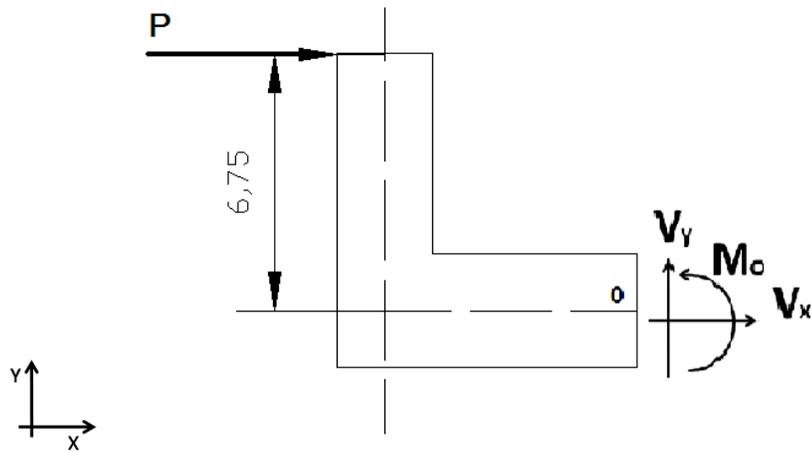


Figura 4.9 Diagrama de cuerpo libre de la geometría generalizada del bloque sometido a tensión sin empotramiento. *Nota:* Dimensiones en milímetros [mm]

De las ecuaciones de equilibrio:

$$\sum F_x = 0$$

$$V_x + P = 0$$

$$V_x = -P$$

$$\sum F_y = 0$$

$$V_y = 0$$

$$\sum M_o = 0$$

$$M_o - \frac{6.75}{1000} * P = 0$$

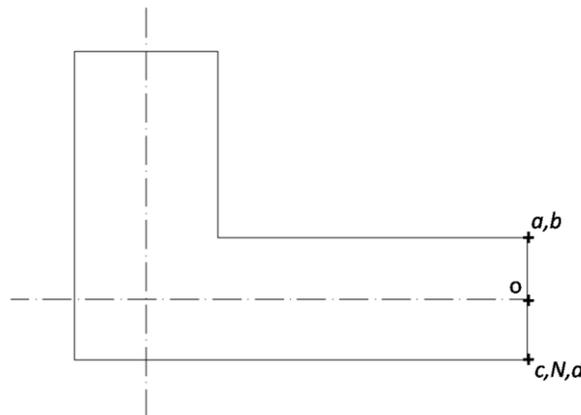
$$M_o = \frac{6.75}{1000} * 394.64N$$

$$M_o = 2.66 Nm$$

Según la ecuación de esfuerzo normal para vigas en flexión (**Ec. 2.18**), el esfuerzo normal σ en el punto N debido al momento M_o viene dado por:

$$\sigma_{M_o} = \frac{M_o c}{I}$$

Donde c es la distancia existente entre el centroide de la sección transversal y el punto N . I es la Inercia de la sección transversal en la cual se encuentran los puntos N y O (región $abcd$) como se muestra en la Figura 4.10



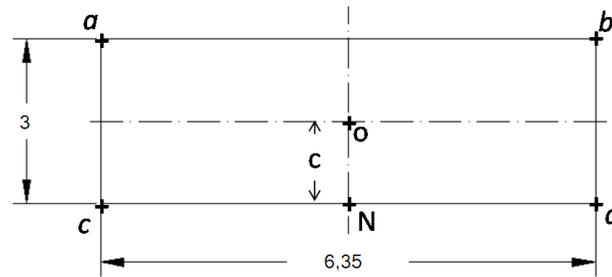


Figura 4.10 Región abcd en la sección transversal del empotramiento. Nota: Dimensiones en milímetros [mm]

Así, tenemos que, de la Ecuación 36:

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

$$I = \frac{1}{12} \times \frac{6,3500}{1000} \left(\frac{3}{1000} \right)^3 m^4$$

$$I = 1.428 * 10^{-11} m^4$$

Por lo tanto, como se ejemplifica en la **Figura 4.11**, el esfuerzo en el punto N por efecto del Momento aplicado es:

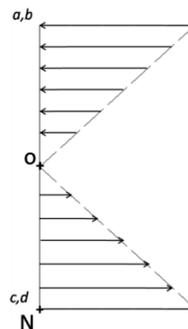


Figura 4.11 Variación del esfuerzo en la región abcd producto del momento interno resultante en el bloque sometido a tensión.

Así, de la *Ecuación 2.18*:

$$\sigma_{M_o} = \frac{M_o c}{I}$$

$$\sigma_{M_o} = \frac{2.66 \text{ Nm} * \frac{3}{2 * 1000} \text{ m}}{1.42875 * 10^{-11} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_{M_o} = 279.67 \text{ MP}$$

Tensión

Al igual que el esfuerzo normal ocasionado por el momento flector M_2 , en la región *abcd* (Ver *Figura 4.12*) también existe una distribución de esfuerzo normal debido a la fuerza V_x

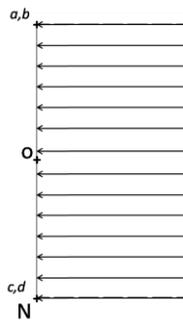


Figura 4.12 Distribución de Esfuerzo producto de la Fuerza V_x en la región *abcd* en el bloque sometido a tensión.

Donde la magnitud del esfuerzo viene dada por:

$$\sigma_V = \frac{V_x}{A_{abcd}} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

$$\sigma_V = \frac{394.64 \text{ N}}{\left(\frac{6,3500}{1000} * \frac{3}{1000}\right) \text{ m}^2}$$

$$\sigma_V = 20.716 \text{ MP} \quad \text{Compresión}$$

Por superposición, el esfuerzo normal resultante en el punto N viene dado por la suma algebraica de los esfuerzos anteriormente calculados.

$$\sigma_N = \sigma_{M_o} - \sigma_V \quad (\text{Ec. 4.6})$$

Donde σ_V tiene signo negativo por ser de compresión

$$\begin{aligned} \sigma_N &= (279.67 - 20.716) \text{ MPa} \\ \sigma_N &= 258.955 \text{ MPa} \quad \text{Tensión} \end{aligned}$$

4.2.3.2 Cálculo de Esfuerzo para el Bloque sometido a Compresión

Se realizó el mismo procedimiento para el caso de cargas externas a compresión sobre el espécimen reportando un valor de esfuerzo asociado de,

$$\sigma_N = -258.955 \text{ MPa} \quad \text{Compresión}$$

4.3 Comparación de los métodos alternativos con el Método de Galgas Extensométricas.

Tomando en cuenta que el procedimiento experimental de las galgas extensométricas mide las deformaciones reales producidas en el espécimen y además fue realizado bajo las condiciones adecuadas, se tomó este como valor patrón para validar los resultados obtenidos mediante los métodos alternativos utilizados para la geometría en estudio.

Comparando los valores obtenidos por los métodos alternativos con el ensayo de galgas extensométricas obtuvimos los siguientes resultados,

Desplazamiento [mm]	ANSYS Esfuerzo [Mpa]	Galgas Esfuerzos a tracción [Mpa]	Diferencia %
0,05	66	67	1,49
0,1	132	135	1,85
0,15	199	204	2,21
0,18	240	246	2,43

Tabla 4.6 Diferencia porcentual entre el método de galgas extensométrica (esfuerzos a tracción) y el programa de simulación por elementos finitos “ANSYS”

Desplazamiento [mm]	ANSYS Esfuerzo [Mpa]	Galgas Esfuerzos a compresión [Mpa]	Diferencia %
0,05	66	65	1,54
0,1	132	131	0,76
0,15	199	196	1,53
0,18	240	238	0,84

Tabla 4.7 Diferencia porcentual entre el método de galgas extensométrica (esfuerzos a compresión) y el programa de simulación por elementos finitos “ANSYS”

Desplazamiento [mm]	Castigliano Esfuerzo [Mpa]	Galgas Esfuerzo de Traccion [Mpa]	Diferencia %
0,05	71,9	67	7,31
0,1	143,8	134,5	6,91
0,15	215,7	203,5	6,00
0,18	258,9	246	5,24

Tabla 4.8 Diferencia porcentual entre el método de galgas extensométrica (esfuerzos a tracción) y el método de Castigliano

Desplazamiento [mm]	Castigliano Esfuerzo [Mpa]	Galgas Esfuerzo de Compresion [Mpa]	Diferencia %
0,05	71,9	65	10,62
0,1	143,8	131	9,77
0,15	215,7	196	10,05
0,18	258,9	238	8,78

Tabla 4.9 Diferencia porcentual entre el método de galgas extenso métrica (esfuerzos a compresión) y el método de Castigliano.

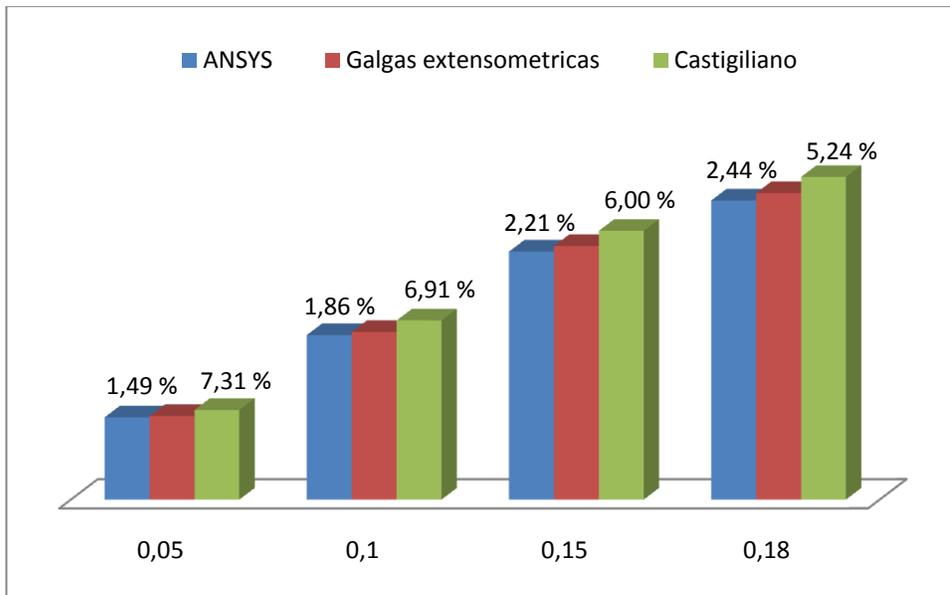


Grafico 4.1 Comparación de los métodos alternativos con respecto al ensayo de galgas extensométricas, estado a tracción.

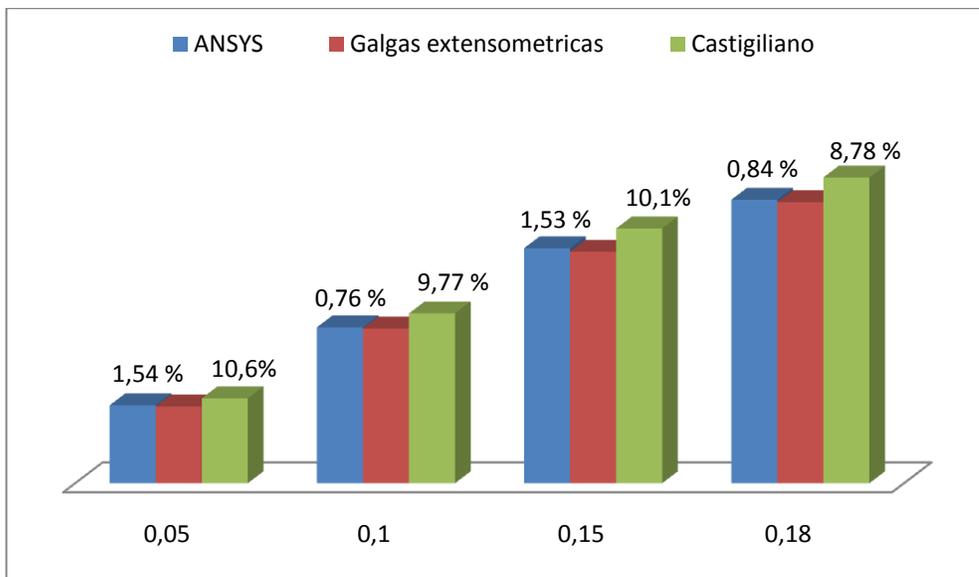


Grafico 4.2 Comparación de los métodos alternativos con respecto al ensayo de galgas extensométricas, estado a Compresión.

Según las diferencias porcentuales obtenidas para cada punto de desplazamiento entre las paredes del espécimen, se evidenció que utilizando el Programa Computacional “ANSYS” se obtuvieron valores más representativos de los reales en comparación a la teoría de Castigliano, resultando los datos recopilados mediante la teoría de Castigliano siempre por encima del valor patrón recopilado del ensayo de galgas extensométricas en el estado de carga a tracción y los resultados mediante el programa computacional “ANSYS” por debajo de este. En los valores de esfuerzos correspondientes al estado de cargas a compresión los dos métodos alternativos presentaron resultados por encima de los obtenidos mediante el ensayo de galgas extensométricas para este estado (*Grafico 4.1 y 4.2*). Cabe destacar que ambos métodos alternativos son válidos al momento de representar los valores reales de esfuerzo en el espécimen dentro del rango de deformaciones trabajadas, producto del bajo porcentaje de diferencia con respecto a los resultados del ensayo de galgas extensométricas.

4.4 Variación del Esfuerzo Aplicado durante el Desgaste

Tomando en cuenta que el método de simulación por el programa “ANSYS” reportó los resultados más cercanos a las deformaciones reales inducidas en el espécimen, podemos obtener la tendencia de la variación de esfuerzo en función de la profundidad de desgaste a través de este. En este sentido, recordando la geometría de la probeta (figura 3.3) y las características del ensayo, se estimó la magnitud del esfuerzo generada en el espécimen variando la profundidad de desgaste a un paso de 0,5 mm desde la superficie de la probeta hasta alcanzar una profundidad de desgaste (d) de 1,5 mm, podemos visualizar en la *Figura 4.13* como el continuo aumento en la profundidad de desgaste incrementa la magnitud del estado de esfuerzo a tracción sobre la superficie del bloque en contacto con el anillo y varía la distribución de los esfuerzos a medida que el ensayo avanza, de igual forma se presenta la misma

tendencia para el estado a compresión del espécimen aumentando la intensidad del estado de esfuerzo a medida que aumenta el desgaste en la probeta y el cambio en la distribución de los esfuerzos en el desarrollo del ensayo.

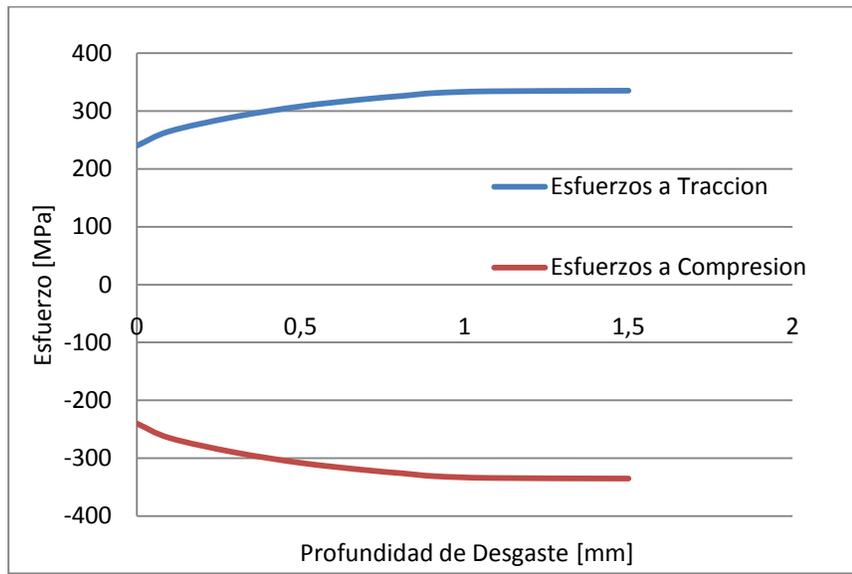


Grafico 4.3 Grafica de Variación del Estado de Esfuerzo en Función de la Profundidad de Desgaste

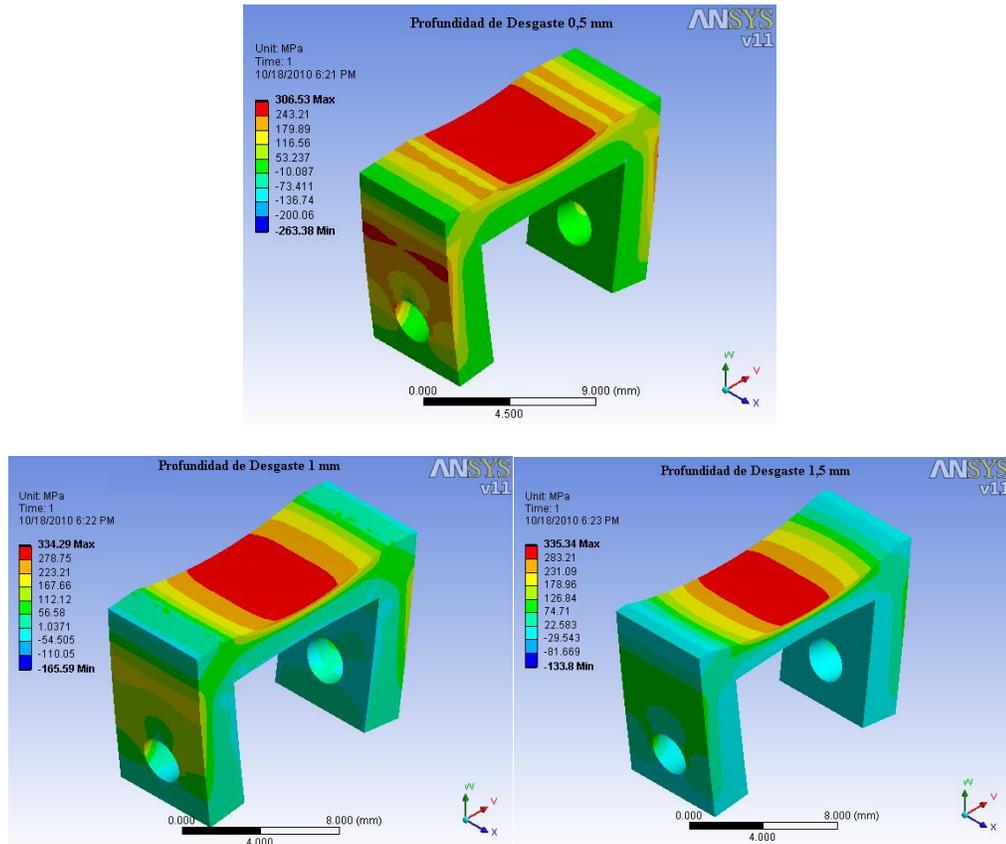


Figura 4.13 Variación de la distribución de los esfuerzos a medida que avanza el ensayo de desgaste, cargas a tracción.

4.5 Ensayo de dureza.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de Dureza Vickers que se midieron en la superficie del bloque que se mantendría en contacto con el anillo en el ensayo de desgaste, al ser sometidos a un estado de carga de tracción, compresión y nulo.

La **Tabla 4.10** muestra la medición de la dureza en el acero AISI O1, la **Tabla 4.11** muestra la medición de la dureza en el acero AISI D3 y la **Tabla 4.12** los valores de dureza para el acero AISI 4140.

Acero AISI 4140

Magnitud del Estado de Esfuerzo [Mpa]	Carga de Indentación 30 Kg	Carga de Indentación 1000 gr	Carga de Indentación 300 gr
-246	343,3	328,5	323
Desviación estandar	1,2	2,2	2,02
0	338,3	316,26	316,73
Desviación estandar	2,1	1,57	1,77
246	334,5	312,2	311,54
Desviación estandar	1,2	0,93	1,03
Variación de -246 con 0	1,50%	3,78%	2,22%
Variación de 246 con 0	1,30%	1,81%	2,02%

Tabla 4.10 Valores de dureza obtenido del bloque de acero AISI 4140 asociado a los distintos estados de esfuerzo.

Acero AISI O1

Magnitud del Estado de Esfuerzo [Mpa]	Carga de Indentación 30 Kg	Carga de Indentación 1000 gr	Carga de Indentación 300 gr
-246	210,16	212,83	213,41
Desviación estandar	2,1	2,21	1,6
0	204	207,3	206,95
Desviación estandar	2,11	2,2	2,3
246	197,53	200,99	200,5
Desviación estandar	2,96	1,58	2,1
Variación de -246 con 0	3,90%	3,28%	3,37%
Variación de 246 con 0	2,09%	2,51%	2,99%

Tabla 4.11 Valores de dureza obtenido del bloque de acero AISI O1 asociado a los distintos estados de esfuerzo.

Acero AISI D3

Magnitud del Estado de Esfuerzo [Mpa]	Carga de Indentación 30 Kg	Carga de Indentación 1000 gr	Carga de Indentación 300 gr
-246	246	265	259
Desviación estandar	1,65	2,33	1,84
0	240	255	252
Desviación estandar	1,5	1,42	1,68
246	236	247	248
Desviación estandar	0,66	2,33	1,6
Variación de -246 con 0	2,50%	3,80%	4,50%
Variación de 246 con 0	1,90%	3,40%	2,02%

Tabla 4.12 Valores de dureza obtenido del bloque de acero AISI D3 asociado a los distintos estados de esfuerzo.

Los resultados de dureza Vickers mostrados en la *Tabla 4.10*, *Tabla 4.11*, *Tabla 4.12* se obtuvieron para diferentes cargas, esto permitió medir tanto micro indentación como macro indentación en los bloques en estudio, las cargas aplicadas para obtener micro indentación fueron 300 gramos y 1000 gramos y para obtener Macro indentación se aplicó una carga de 30 kilogramos.

Los *Graficos 4.4*, *4.5* y *4.6* muestran la comparación del número de dureza de los bloques de acero AISI O1, AISI D3 y AISI 4140 respectivamente, cuando se encuentran en estado de esfuerzo de tensión, compresión y sin estado de esfuerzo.

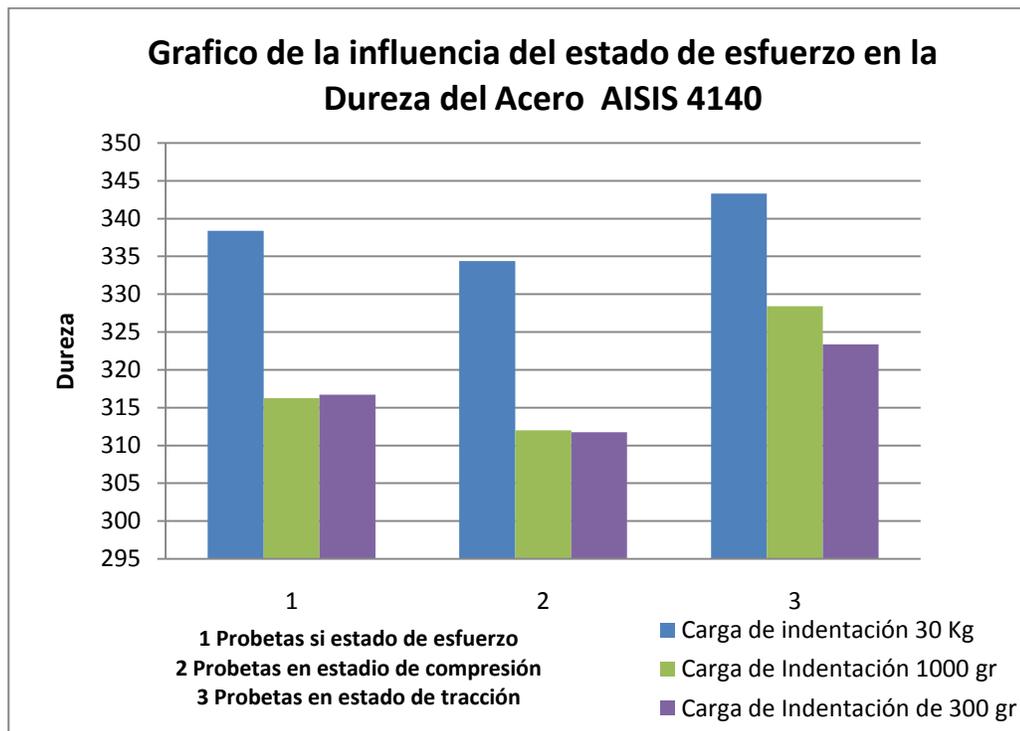


Grafico 4.4 Representación grafica de los valores promedio de dureza para el acero 4140

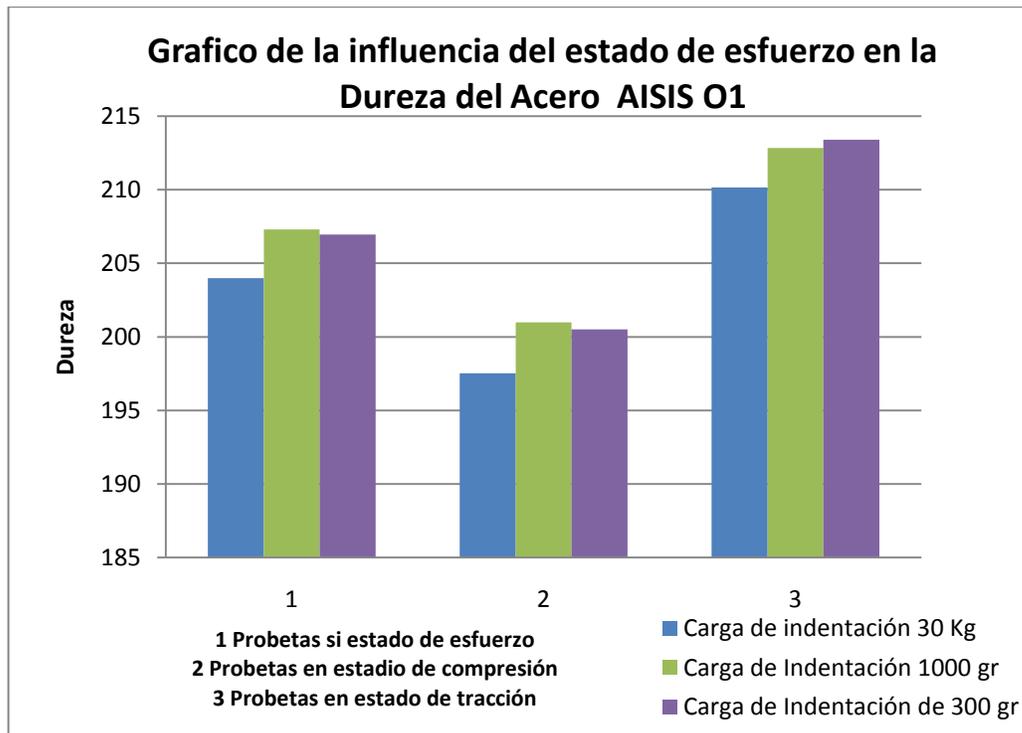


Grafico 4.5 Representación grafica de los valores promedio de dureza para el acero AISI O1

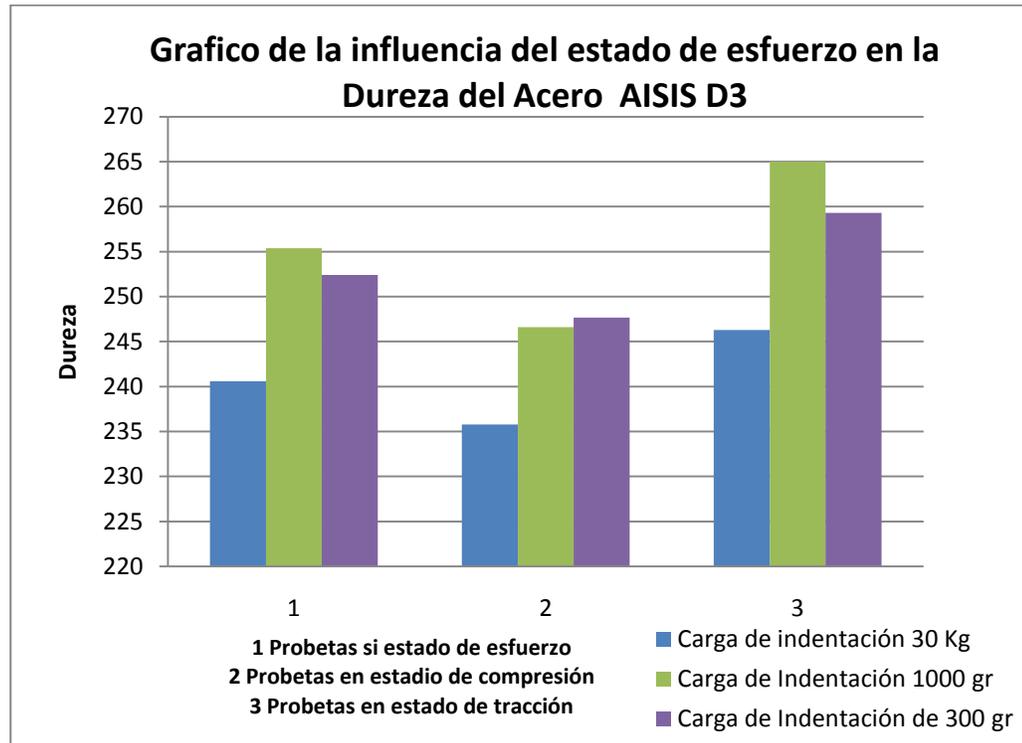


Grafico 4.6 Representación grafica de los valores promedio de dureza para el acero AISI D3

El **Grafico 4.4** los resultados muestran que los ensayos de dureza que se realizaron en el bloque de acero AISI 4140, al estar sometido a estado de carga de compresión, reportaron un aumento en el número de dureza en comparación con los resultados obtenidos en el ensayo sin estado de carga. Por su parte, el estado de esfuerzo de tracción dio como resultado una disminución en la dureza obtenida, llevándonos a afirmar que existe una influencia de los estados de esfuerzos en la dureza del material. Se observa también que el estado de carga a compresión tiene mayor influencia sobre el valor de dureza que el estado de carga a tracción.

De acuerdo a los valores que presenta el acero AISI O1 (**Grafico 4.5**) para las tres cargas de indentación utilizadas, los valores de dureza resultantes de las probetas sometidas a un estado de carga a compresión muestran una mayor

influencia en su variación que las probetas sometidas a un estado de carga a tracción.

Los resultados del acero AISI D3 (*Grafico 4.6*) de igual manera obedecen el comportamiento presentado por valores del acero AISI 4140 y el acero AISI O1 mostrados en las *Tablas 4.5 y 4.6*, respectivamente.

Del análisis anterior se puede afirmar que los valores de dureza estimados para los tres materiales estudiados se ven afectados al ser sometidos a los estados de carga que tienen asociados esfuerzos elásticos momentáneamente aplicados.

4.6 Ensayo de Desgaste por Deslizamiento sin lubricación.

Como se pudo observar en el **Grafico 4.3** la magnitud del estado de esfuerzo tanto a tracción como compresión aumenta a medida que la profundidad de desgaste se hace mayor, por lo que en el ensayo de desgaste se trabajara con un promedio entre el valor final e inicial de dichos esfuerzos generados.

Estado de Esfuerzo	Esfuerzo Promedio [Mpa]
Tracción	290,5
Compresión	-290,5

Tabla 4.13 Esfuerzo promedio generado en el ensayo de desgaste

Los valores de masa estimados antes y después del ensayo para cada uno de los materiales bajo distintos estados de esfuerzos se muestran en la siguiente tabla,

Magnitud del Esfuerzo [Mpa]	Masa Desgastada AISI D3 [gr]	S	Masa Desgastada AISI 4140 [gr]	S	Masa Desgastada AISI O1 [gr]	S
-290,5	0,7054	0,048	0,6779	0,067	0,6782	0,057
0	0,7581	0,061	0,7153	0,073	0,7293	0,055
290,5	0,8100	0,049	0,765	0,063	0,7597	0,066

Nota: S representa la desviación estandar

Tabla 4.14 Masa Perdida en el ensayo de desgaste de los bloques bajo distintos estados de esfuerzos.

Teniendo estos resultados se calcularon los volúmenes asociados a dichas masas para una densidad constante de los aceros de 0,00785 [g/mm³], de la siguiente manera,

Calculo tipo

Calculo del volumen de los 3 aceros sin estado de carga.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$V(\text{Acero AISI D3}) = \frac{m}{\rho} = \frac{0.7581}{0.00785} = 96.568 \text{ mm}^3$$

$$V(\text{Acero AISI 4140}) = \frac{m}{\rho} = \frac{0.7153}{0.00785} = 91.121 \text{ mm}^3$$

$$V(\text{Acero AISI O1}) = \frac{m}{\rho} = \frac{0.7293}{0.00785} = 92.91 \text{ mm}^3$$

Los valores del volumen que se obtuvieron en las probetas bajo estado de carga para los tres materiales en estudio se muestran en las **Tablas 4.16, 4.17 y 4.18**.

Comparando el volumen teórico máximo (90.8 mm³), el cual fue utilizado para el calculo de los parámetros asociados al ensayo de desgaste, con los valores experimentales que se obtuvieron en los ensayos sin estado de carga alguno arrojan un porcentaje de variación de 2,32 %; 0,35% y 6,35% en los aceros AISI O1, 4140 y D3, respectivamente. Esta pequeña diferencia posiblemente se deba a que en principio el coeficiente dimensional de desgaste (k) depende

imprescindiblemente de las condiciones de ensayo y de los materiales estudiados, resultando ser complicado la reproducción exacta de las condiciones donde fueron calculados los mismos. Según Norton, en su libro *Diseño de Maquinas*, este valor por lo general llega a presentar una variación de hasta el 20% con respecto a los valores experimentales que se obtienen. Sin embargo, aun existiendo esta diferencia, la información suministrada por la utilización de estos coeficientes en cuanto a la comparación de las relaciones de desgaste de los dos materiales en estudio fue consistente.

Para poder realizar una comparación entre el volumen desgastado de los bloques que se ensayaron sin estado de esfuerzo con los bloques que se ensayaron bajo estado de esfuerzo de tracción y de compresión, los parámetros de ensayos (Carga, velocidad y tiempo) para todos los bloques de un mismo material fueron idénticos. *La Tabla 4.15* muestra los valores de dichos parámetros utilizados en el ensayo de desgaste.

Parametros	ACEROS AISI		
	O1	4140	D3
Revoluciones (rpm)	100	100	100
Carga (Lbrf)	25	25	25
Tiempo (min)	41	70	50

Tabla 4.15 Parámetros de ensayo de ensayo.

Para la comparación del volumen de desgaste entre los bloques sin estado de carga externa y los bloques con estado de cargas de tensión y compresión se escogió como valor patrón el volumen de desgaste que se obtuvo experimentalmente en los bloques sin estado de carga.

4.6.1 Desgaste en Acero AISI O1.

4.6.1.1 Influencia del Estado de Esfuerzo en el Acero AISI O1.

En la **Tabla 4.13** se puede observar la variación del volumen de desgaste cuando el bloque en estudio fue sometido a una carga externa de tracción y compresión. Comparando el volumen de desgaste que presentó el bloque en estado de esfuerzos de compresión (87.926 mm^3) con el volumen de desgaste patrón (92.91 mm^3), se puede ver que existe una disminución de 6.513 mm^3 que representa un porcentaje de 5.36 %. Con estos resultados se puede validar que existe una influencia en el volumen desgastado cuando el bloque está en estado de esfuerzo de compresión ya que se obtuvo una desviación estándar menor a la diferencia entre los volúmenes comparados, esta desviación estándar también se puede apreciar en la **Tabla 4.16**.

Magnitud del Esfuerzo [Mpa]	Volumen de Desgaste Patron [mm3]	Volumen de Desgaste Patron [mm3]	Desviación Estandar S
-290,5	92,91	87,926	1,53
0	92,91	92,91	2,33
290,5	92,91	96,782	1,16

Tabla 4.16 Variación del volumen de desgaste del acero AISI O1.

En la **Tabla 4.16** se puede ver que también existe una influencia del estado de esfuerzo de tracción en el volumen desgastado al compararlo con el volumen patrón. La medida del volumen con el estado de esfuerzo de tensión (96.782 mm^3) produce un aumento en el desgaste de un 3.872 mm^3 que representa un porcentaje de 4.167%, esta influencia es validada por existir una desviación estándar menor a este porcentaje de variación de volumen.

En el siguiente *Grafico 4.7* se presenta la variación que existe en el volumen de desgaste en función al esfuerzo aplicado.

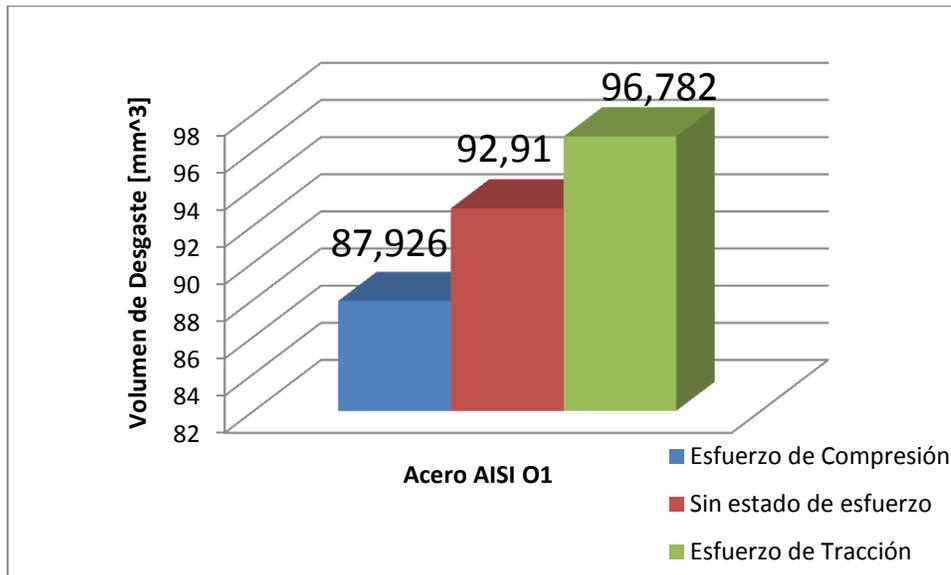


Grafico 4.7 Variación del Volumen de Desgaste en Función del Esfuerzo Aplicado para Bloques de Acero AISI O1.

4.6.2 Desgaste en Acero AISI D3.

4.6.2.1 Influencia del Estado de Esfuerzo en el Acero AISI D3.

En la *Tabla 4.17* se puede observar la variación del volumen de desgaste cuando el acero AISI D3 es sometido a cargas externas. Comparando el volumen de desgaste que presentó el bloque bajo un estado de esfuerzo de compresión (90.961 mm^3) con el volumen de desgaste patrón (96.568 mm^3), se puede ver que existe una disminución de 5.607 mm^3 que representa un porcentaje de 5.81 %. Este resultado se puede validar por la desviación estándar que se obtuvo y que se muestra en la tabla 4.14.

Magnitud del Esfuerzo [Mpa]	Volumen de Desgaste Patron [mm ³]	Volumen de Desgaste [mm ³]	Desviación Estandar S
-290,5	96,568	90,961	1,316
0	96,568	96,568	2,328
290,5	96,568	102,351	0,86

Tabla 4.17 Variación del volumen de desgaste.

En la *Tabla 4.17* se puede ver que también existe una influencia del estado de esfuerzo de tracción en el volumen desgastado al compararlo con el volumen patrón. La medida del volumen con el estado de esfuerzo de tensión (102.351 mm³) produce un aumento en el desgaste de un 5.619 mm³ que representa un porcentaje de 5.82 %, esta influencia es validada por existir una desviación estándar menor a este porcentaje de variación de volumen.

En el siguiente *Grafico 4.8* se presenta la variación que existe en el volumen de desgaste en función al esfuerzo aplicado.

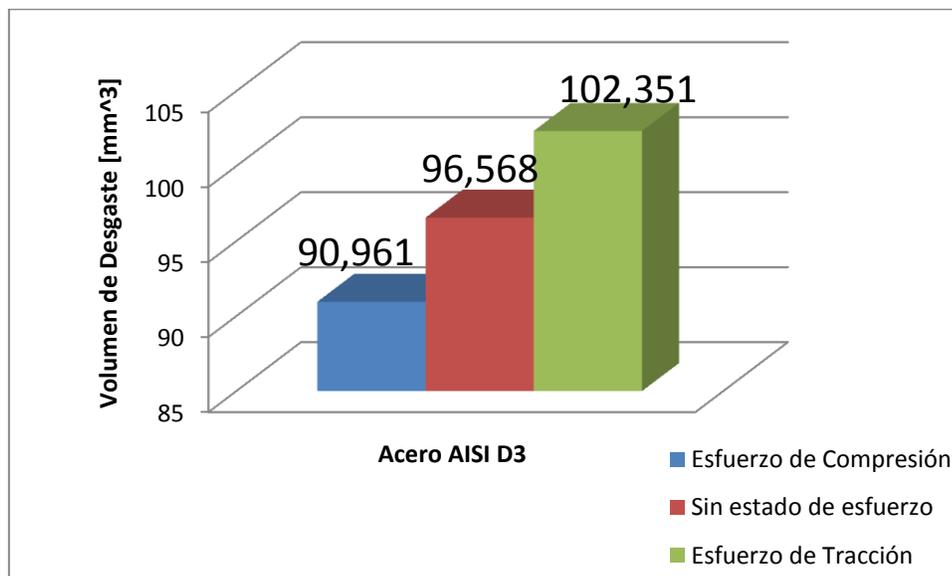


Grafico 4.8 Variación del Volumen de Desgaste en Función del Esfuerzo Aplicado para Bloques de Acero AISI D3.

4.6.3 Desgaste en Acero AISI 4140.

4.6.3.1 Influencia del Estado de Esfuerzo en el Acero AISI 4140.

En la **Tabla 4.18** se puede observar la variación del volumen de desgaste cuando el bloque de acero AISI 4140 en estudio fue sometido a cargas externas. Comparando el volumen de desgaste que presentó el bloque en estado de esfuerzo de compresión (86.351 mm^3) con el volumen de desgaste patrón (91.121 mm^3), se puede ver que existe una disminución de 4.77 mm^3 que representa un porcentaje de 5.23 %. Este resultado se puede validar por la desviación estándar que se obtuvo.

Magnitud del Esfuerzo [Mpa]	Volumen de Desgaste Patrón [mm ³]	Volumen de Desgaste Patrón [mm ³]	Desviación Estandar S
-290,5	91,121	86,351	2,170
0	91,121	91,121	1,542
290,5	91,121	97,267	1,205

Tabla 4.18 Variación del volumen de desgaste.

En la **Tabla 4.18** se observa que existe una influencia del estado de esfuerzo de tracción en el volumen desgastado al compararlo con el volumen patrón. La medida del volumen con el estado de tensión (97.267 mm^3) produce un aumento en el desgaste de un 6.146 mm^3 que representa un porcentaje de 6.645 %, esta influencia es validada por existir una desviación estándar menor a la diferencia del volumen desgastado entre los dos bloques comparados.

En el siguiente **Grafico 4.9** se presenta la variación que existe en el volumen de desgaste en función al esfuerzo aplicado.

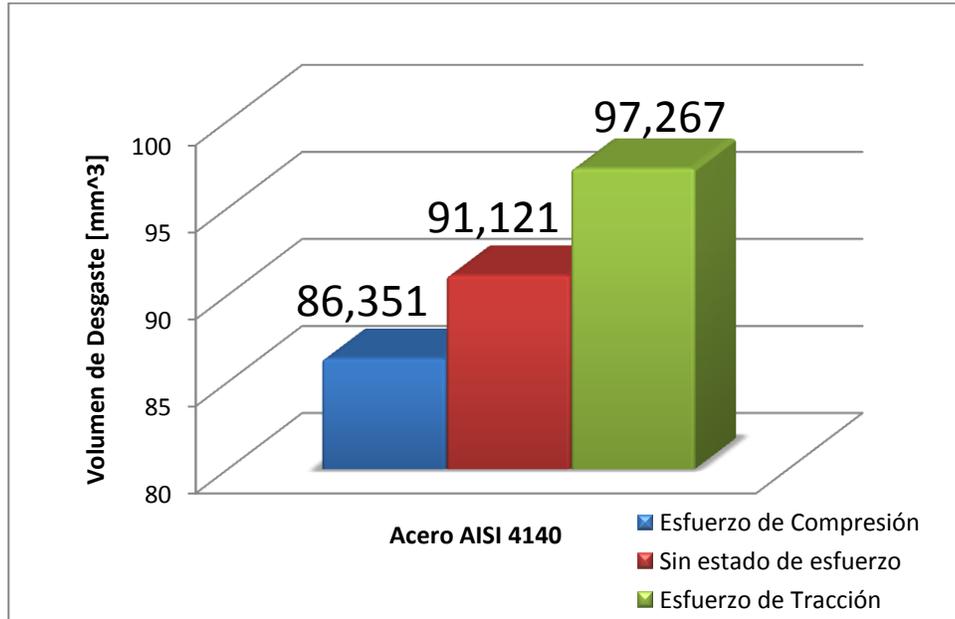


Gráfico 4.9 Variación del Volumen de Desgaste en Función del Esfuerzo Aplicado para Bloques de Acero AISI 4140.

4.6.4 Tasa de Desgaste

Se determinó la tasa de desgaste de cada uno de los materiales en presencia de los estados de esfuerzo estudiados tomando en cuenta el volumen total perdido en el ensayo de bloque sobre anillo y el tiempo de duración del ensayo de cada acero.

Calculo tipo de tasa de desgaste

Calculo de la tasa de desgaste para los tres materiales sin estado de carga.

$$tasa\ de\ Desgaste = \frac{V}{t} \quad (Ec. 4.8)$$

$$Tasa\ (Acero\ AISI\ 01) = \frac{V}{t} = \frac{92.91}{41} = 0.0378$$

$$Tasa (Acero AISI D3) = \frac{V}{t} = \frac{96.568}{50} = 0.0322$$

$$Tasa (Acero AISI 4140) = \frac{V}{t} = \frac{91.121}{70} = 0.0217$$

La **Tabla 4.19** muestra la tasa de desgaste para los tres aceros en estudio con.

Magnitud del Esfuerzo [MPa]	Taza de Desgaste Acero AISI O1 [mm3/seg]	Taza de Desgaste Acero AISI D3 [mm3/seg]	Taza de Desgaste Acero AISI 4140 [mm3/seg]
-290,5	0,036	0,0303	0,0206
0	0,0378	0,0322	0,0217
290,5	0,0393	0,0341	0,0230

Tabla 4.19 Tasa de Desgaste de los Aceros en Estudio.

Como se puede observar en la **Tabla 4.19** los esfuerzos de compresión generados en la zona elástica de los materiales favorecieron la resistencia al desgaste de los tres aceros con la consecuente reducción de la tasa de desgaste (7.01% para el acero AISI O1, 6.94 % para el acero AISI D3 y 5.23 % para el acero AISI 4140) respecto a la tasa hallada experimentalmente para los pares tribológicos sin estado de carga; lo anterior puede atribuirse a que el estado de esfuerzo de compresión generado en el régimen elástico y los esfuerzos cortantes presentes entre las superficies en contacto producto de la interacción deslizante, durante el transcurso del ensayo, producen un esfuerzo efectivo que disminuye la formación y expulsión de virutas (debris) característico del desgaste adhesivo, principal mecanismo de desgaste originado por el ensayo y condiciones de los pares tribológicos de estudio.

Por otro lado, la aplicación de la carga que generaba un estado de esfuerzo de tensión dentro del régimen elástico en cada bloque ocasionó que el volumen de desgaste fuese mayor en los tres materiales en comparación con el volumen de desgaste patrón. Para los tres aceros el porcentaje de disminución fue el

siguiente 4.167% para el acero AISI O1, 6.854 % para el acero AISI D3 y 6.645 % para el acero AISI 4140 respecto a la tasa hallada experimentalmente para los pares tribológicos sin estado de carga. La razón de este aumento de volumen desprendido puede atribuirse a que durante el transcurso del ensayo, se produce un esfuerzo efectivo que ayuda a facilitar a la formación y expulsión de virutas.

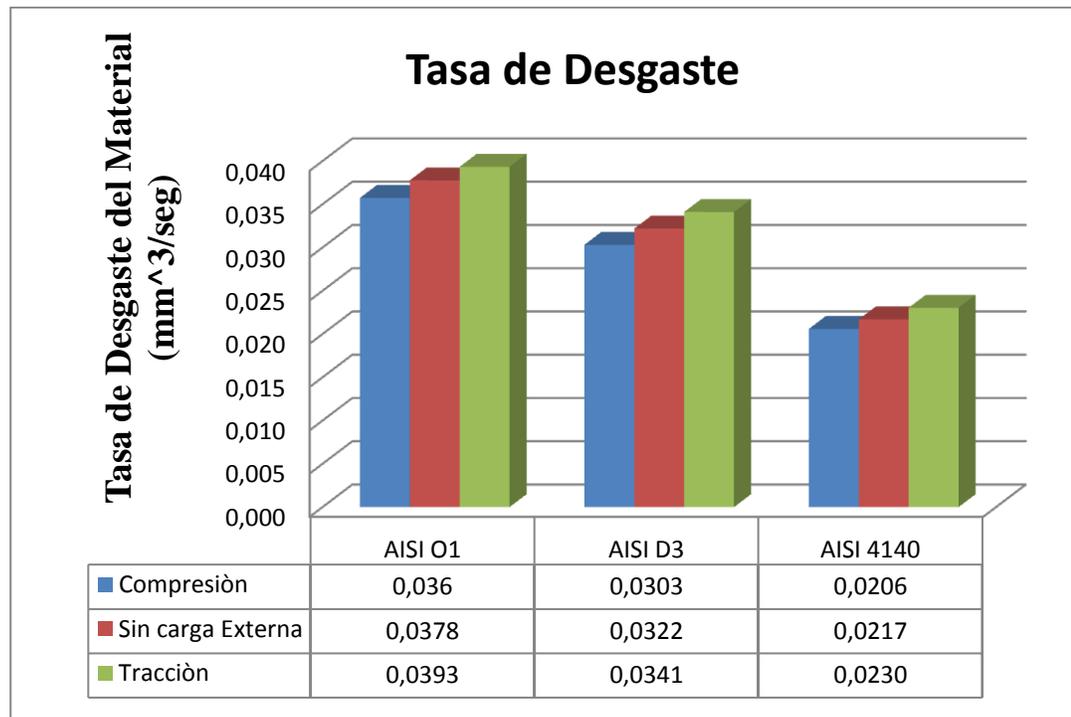


Grafico 4.10 Tasa de Desgaste de los Aceros en Estudio.

4.7 Influencia de la dureza en el volumen desgastado.

Anteriormente se demostró que el número de dureza y el volumen desgastado varían en función de la magnitud del estado de esfuerzo presente, se sabe también por la ecuación propuesta por Archard (Ecuación 2.13) que el volumen desgastado es inversamente proporcional al número de dureza, lo que no está claro es cómo influye el valor de la dureza en el volumen desgastado debido a

la magnitud del estado de esfuerzo presente. En la ecuación propuesta por Archard (Ecuación 2.13) hasta ahora no muestra la dependencia existente del desgaste con el estado de esfuerzo presente en los materiales. A fin de tomar en cuenta dicha influencia, se incorpora en la ecuación propuesta por Archard la relación existente entre la dureza y la magnitud del esfuerzo presente. Para ello se tomo en cuenta el estudio realizado por Higashimita, Tama-ku y Kawasaki, donde los autores demostraron que la relación de la dureza con respecto a la magnitud del estado de esfuerzo presente es de forma lineal en la zona de deformación elástica.

Con el valor de dureza obtenido en los aceros para las tres condiciones de esfuerzo trabajadas, se obtuvieron tres puntos del valor de la dureza en función de la magnitud del esfuerzo a la que fue sometida la probeta, apoyándonos en esto se construyó la gráfica de Dureza vs Esfuerzo de los tres materiales en estudio. En los *Gráficos 4.11, 4.12 y 4.13* se representan estas rectas con su respectiva desviación estándar para cada punto.

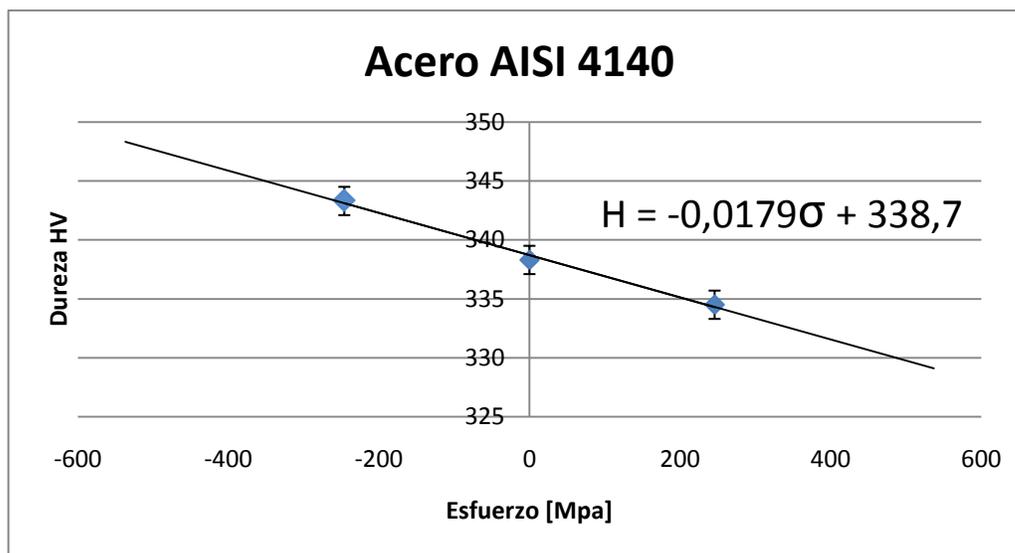


Gráfico 4.11 Dureza en función de la magnitud de esfuerzo de Acero AISI 4140

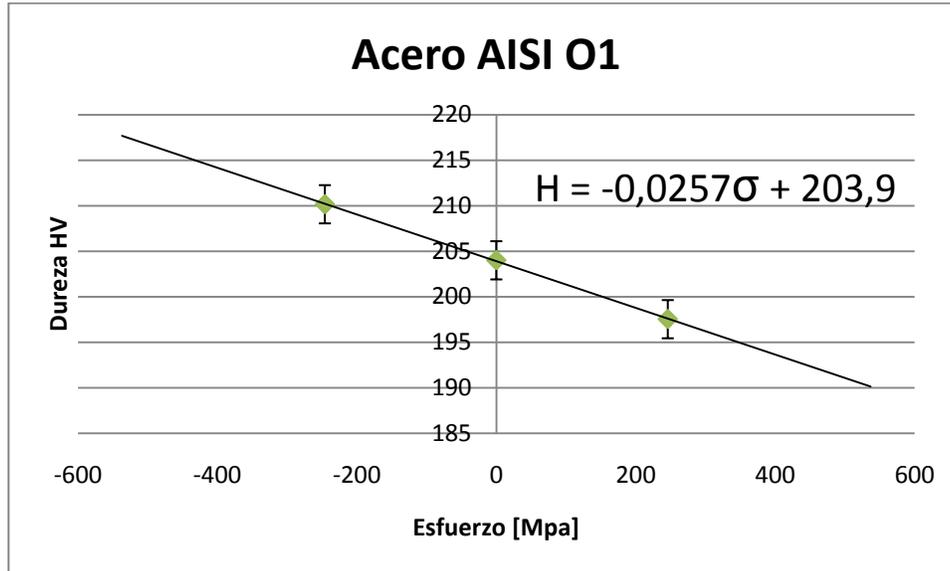


Gráfico 4.12 Dureza en función de la magnitud de esfuerzo de Acero AISI O1

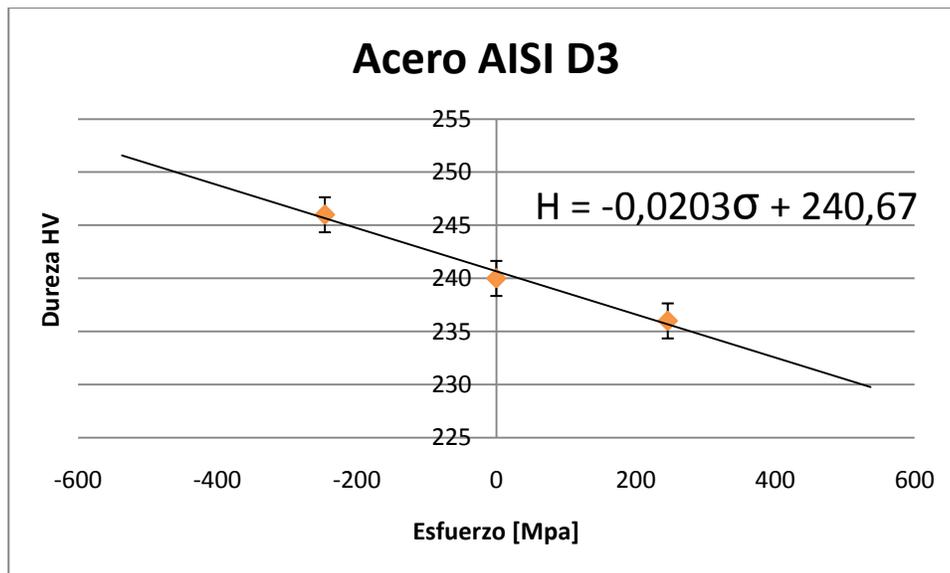


Gráfico 4.13 Dureza en función de la magnitud de esfuerzo de Acero AISI D3

Con base a la tendencia lineal presentada por el comportamiento de la dureza en función de los esfuerzos, se propone una expresión matemática que cambia la ecuación propuesta por Archard, la misma toma en cuenta los esfuerzos

elásticos al que se someten los materiales y que puede estar representada de la siguiente manera,

$$V = \frac{K * W * L}{H'} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Donde,

$$H' = A * \sigma + H_0 \quad (\text{Ec. 4.10})$$

Definiendo estos parámetros como,

H': Valor de la dureza que tiene en cuenta el estado de esfuerzo elástico

A: Constante adimensional que depende del material

σ: Magnitud del esfuerzo elástico al que se encuentra sometida la zona de contacto del material en estudio

H₀: Valor de dureza absoluta del material en estudio sin influencia de estado de esfuerzo alguno.

Las constantes *A* y *H₀* para los materiales estudiados se presentan en la **Tabla 4.20**

Acero	A	Ho
AISI O1	0,0257	203,9
AISI D3	0,0203	240,67
AISI 4140	0,00179	338,7

Tabla 4.20. Constantes de los aceros.

Con el fin de cuantificar los resultados obtenidos por este planteamiento, se estimó el coeficiente adimensional de desgaste (K) real para cada uno de los

aceros en estudio, utilizando el volumen desgastado y la dureza obtenida sin estado de carga alguno, tomando en cuenta los parámetros carga (W) y longitud de deslizamiento (L) aplicados en ensayo para cada material.

Calculo tipo.

Acero AISI O1:

$$V=92.91 \text{ mm}^3$$

$$H \text{ (Sin estado de esfuerzo)}= 204.1 \text{ HV}$$

$$H \text{ (Bajo estado de esfuerzo de tracción)}= 197.8 \text{ HV}$$

$$H \text{ (Bajo estado de esfuerzo de compresión)}= 210.26 \text{ HV}$$

$$W = 111.2 \text{ N}$$

$$L= 457 \text{ m}$$

$$K = \frac{V*H}{W*L} = \frac{92,91*1,959}{111,2*457} = 3,58x10^{-3}$$

Tabla 4.21 reportando los valores del coeficiente adimensional de desgaste (K) reales.

Material	K
AISI O1	0,37315089
AISI D3	0,37532494
AISI 4140	0,35968034

Tabla 4.21 Coeficiente adimensional de desgaste real.

Una vez obtenido el coeficiente adimensional (K) para cada uno de los aceros, se procedió a determinar el coeficiente dimensional de desgaste tomando en cuenta la dureza influenciada por los estados de esfuerzos inducidos en los especímenes.

Estimando en primer lugar el valor de dureza a 290,5 MPa el cual es el valor de esfuerzo promedio obtenido a lo largo del ensayo de desgaste, ya que esto nos

permitirá comparar los valores de volumen desgastado resultantes de la modificación propuesta anteriormente (*Ec. 4.9*) con datos los obtenidos experimentalmente.

Se realizó una extrapolación de las rectas detalladas en el **grafico 4.16**, consiguiendo así los valores de dureza correspondientes a la magnitud de esfuerzo (290,5 MPa) trabajada en el ensayo de desgaste.

Material	Dureza [Vickers]	
	Tracción	Compresión
AISI O1	196,434	211,366
AISI 4140	333,500	343,899
AISI D3	234,773	246,567

Tabla 4.22 Valor de dureza correspondiente al esfuerzo promedio aplicado en el ensayo de desgaste.

Calculo tipo.

Para el caso del Acero AISI O1

$$k = \frac{K}{H(\text{Tracción})} = \frac{0.3731089}{196.434} = 0,001889941 \frac{mm^2}{Kg}$$

$$k = \frac{K}{H(\text{Compresión})} = \frac{0.3731089}{211.366} = 0,00176523 \frac{mm^2}{Kg}$$

Tabla 4.23 Reportando los valores de k reales para los tres materiales

Material	K[mm ² /kg Tracción	K[mm ² /kg Compresión
AISI O1	0,00189941	0,00176523
AISI D3	0,00159867	0,0015222
AISI 4140	0,0010785	0,00104589

Tabla 4.23 Coeficiente dimensional de desgaste real.

Estos coeficientes dimensionales (k) permitieron calcular mediante la fórmula de Archard (Ecuación 2.13) el volumen desgastado, esto tomando en cuenta la influencia del estado de esfuerzo en la dureza.

Calculo tipo

Para el caso del Acero AISI O1

$$V (\text{Tracción}) = k * w * L = 0.00189941 * 111.2 * 457 = 96,525 \text{ mm}^3$$

$$V (\text{Compresión}) = k * w * L = 0.00176523 * 111.2 * 45 = 89.71 \text{ mm}^3$$

	Volumen degastado	Volumen degastado	% de variación del volumen
AISI O1	Experimental [mm ³]	Teorico [mm ³]	Teorico- Experimental
TENSIÓN	96,782	96,525	-0,3
COMPRESIÓN	87,926	89,71	2,0
AISI 4140			
TENSIÓN	95,934	92,585	-3,5
COMPRESIÓN	86,351	89,786	4,0
AISI D3			
TENSIÓN	102,187	98,841	-3,3
COMPRESIÓN	90,961	94,113	3,5

Tabla 4.24 Valores del volumen desgastado real y el estimado mediante la propuesta de modificación a la ecuación de Archard.

En la **Tabla 4.24**, se presenta los resultados del volumen de desgaste obtenido por los ensayos realizados y los determinados por la modificación realizada a la ecuación propuesta por Archard (Ecuación 2.13), en la cual el valor de dureza toma en cuenta los esfuerzos experimentados por las probetas. Los dos grupos de resultados fueron comparados entre si para determinar la influencia existente, esta comparación se representa por el porcentaje de variación del volumen que se muestra en la **Tabla 4.24**. Los valores de porcentaje negativo indican que el valor de volumen desgastado teórico se encuentra por debajo del volumen de desgaste experimental. Al observar el porcentaje de variación de ambos resultados se puede apreciar que es muy pequeño, significando esto que la dureza representa un parámetro a ser tomado en cuenta en la variación del volumen desgastado cuando el espécimen en estudio esta bajo un estado de cargas.

4.9 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

En las fotomicrografías que se muestran en la **Figura 4.14**, tomadas en el modo de electrones secundarios, se puede observar la morfología típica generada en este tipo de ensayo para las tres condiciones trabajadas. Las imágenes de las tres muestras fueron captadas con una misma posición en relación a la inclinación de la superficie de observación con respecto al ángulo de incidencia del haz de electrones, asegurándonos esto que no halla ninguna distorsión entre las distintas fotografías mostradas, además de esto se garantizó que el ángulo de incidencia del haz de electrones con respecto a la normal del plano de la superficie de la probeta no superara 60°, de esta manera las dimensiones tomadas en la superficie a través de la micromarca fueran reales y no proyecciones de las mismas. Los especímenes ensayados se caracterizaron por

haber sido ensayados bajo los mismos parámetros de prueba, sin embargo fueron sometidos a distintos estados de cargas los cuales se citan a continuación, la muestra N°1 no le fue aplicada carga alguna al contrario de las muestras N°2 y N°3 las cuales fueron estudiadas aplicando cargas que producían tracción y compresión, respectivamente sobre la superficie en contacto con el anillo.

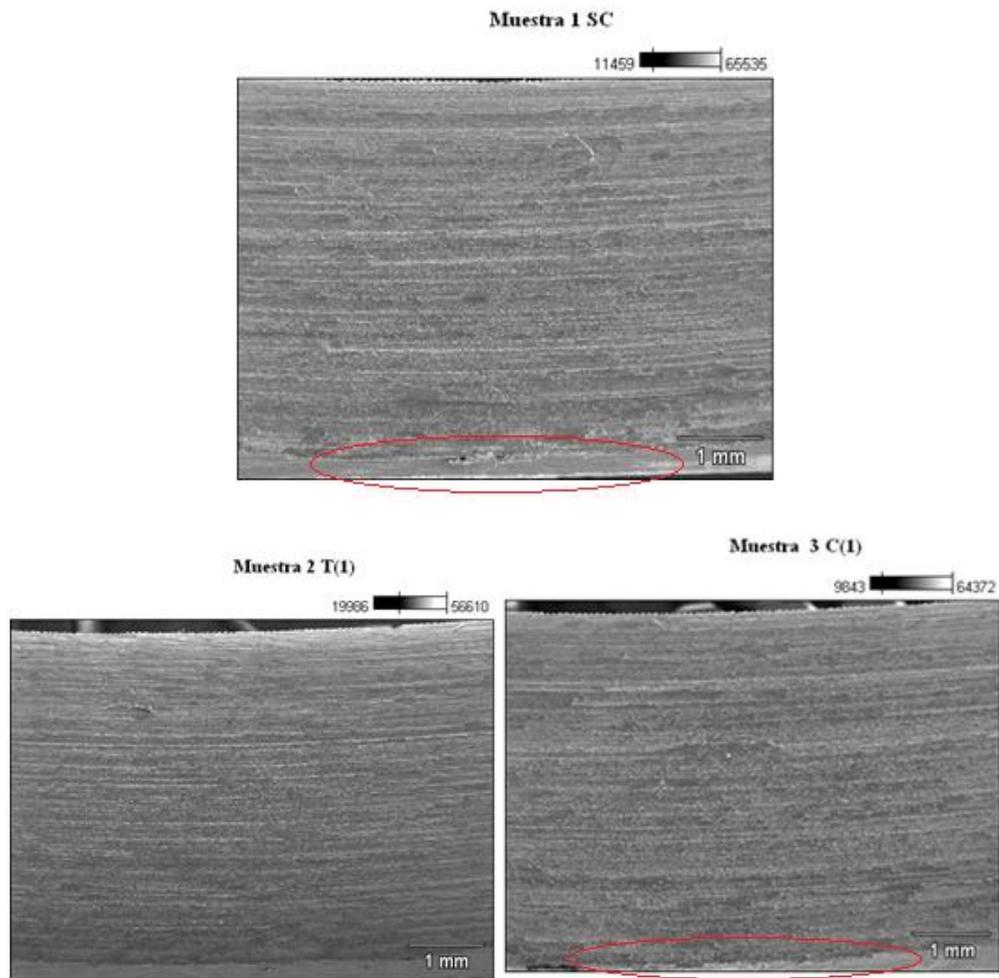


Figura 4.14; Microscopía de la zona de desgaste 1) Sin carga; 2) Carga a tracción; 3) Carga a compresión en modo de electrones secundarios (SE) con magnificación de 100x

En las imágenes, las tres muestras evidencian macroscópicamente, una textura de arado observándose surcos en todas ellas, no obstante tomando en cuenta que las tres fotografías fueron tomadas a la misma magnificación, en la muestra N°2 son menos pronunciadas las marcas de arado presentando una superficie con características bien uniformes en toda su extensión en comparación con las otras dos condiciones. Se detalla en algunas en algunas zonas cierto grado de aplastamiento de material (óvalos amarillos, *Figura 4.16 y 4.17*) que esta asociado al agrietamiento moderado en dirección perpendicular a los surcos en la superficie, lo cual sugiere que hubo arrastre de material conllevando a un endurecimiento por deformación y colapso del mismo, lo que se traduce en agrietamiento orientado perpendicularmente a las líneas de flujo del material, esta característica se puede notar en gran medida en las tomas hechas a mayor magnificación de las muestras N°2 y N°3 (*Figura 4.16 y 4.17*, respectivamente) presentando la muestra N°3 una zona de deformación plástica menos alargada y grietas mas profundas en comparación con la muestra N°2 la cual muestra una zona de deformación bastante amplia y grietas menos profundas. Es importante destacar que tanto la muestra N°1 como la muestra N°3 presentan cierto grado de apilamiento del material hacia los bordes del espécimen con una superficie poco regular (óvalos rojos, *Figura 4.14*). El tono gris homogéneo que presentan las muestras en su superficie, tomando en consideración, que a pesar que el modo de imagen fue en electrones secundarios siempre es posible diferenciar sutilmente contraste composicional, en caso de que existiera una distribución elemental no uniforme en la superficie, lo anteriormente expuesto, aunado al color homogéneo en cuanto al color presente en el campo observado, nos permite sugerir que no existe presencia de partículas de segunda fase que pudieran estar interactuando en el fenómeno de desgaste, esto fue corroborado a través de la técnica de Espectroscopia por Dispersión en Energía de Rayos x (EDS) *Figura 4.18*, donde se evidencia en el espectro de energía una

distribución elemental homogénea la cual corresponde a la composición nominal del acero en estudio.

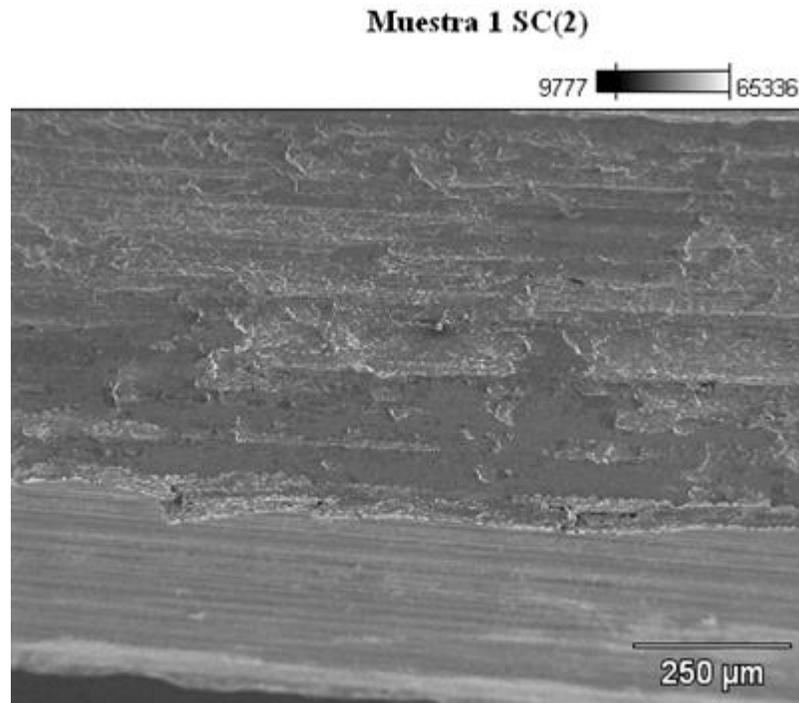


Figura 4.15; fotografía a una magnificación de 100x de la muestra N°1 Estado sin carga

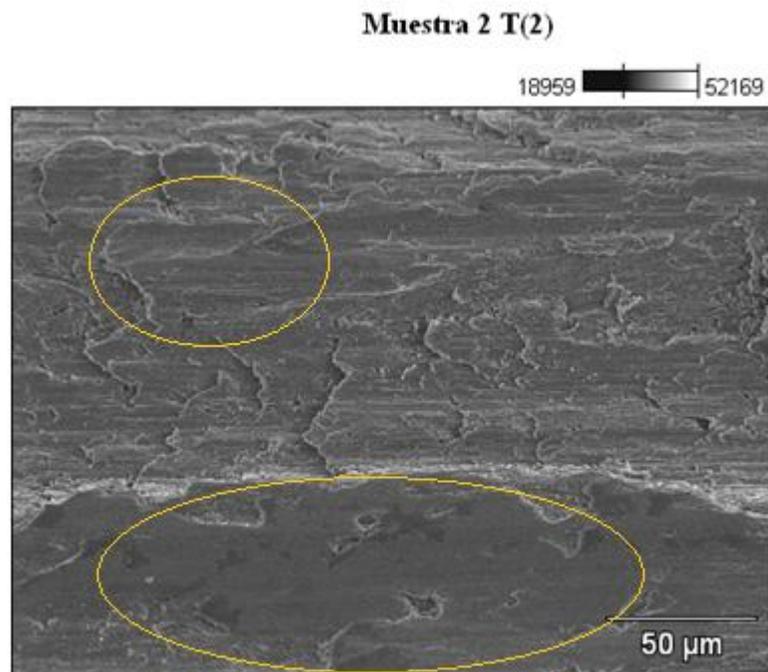


Figura 4.16; fotografía a una magnificación de 500x de la muestra N°2 Carga a tracción

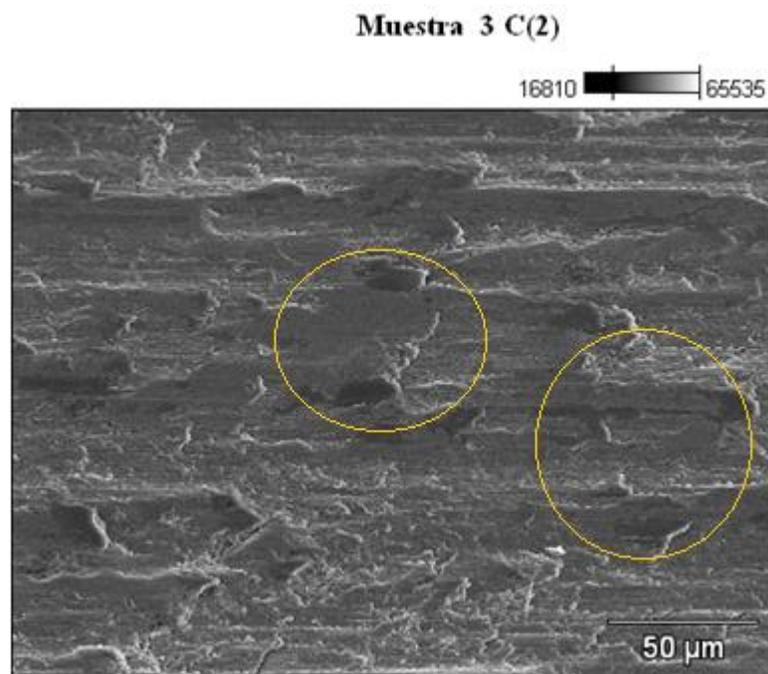


Figura 4.17; fotografía a una magnificación de 500x de la muestra N°3 Carga a compresión

Espectroscopia por Dispersión en Energía de Rayos x (EDS)

Muestra 1 SC(3)

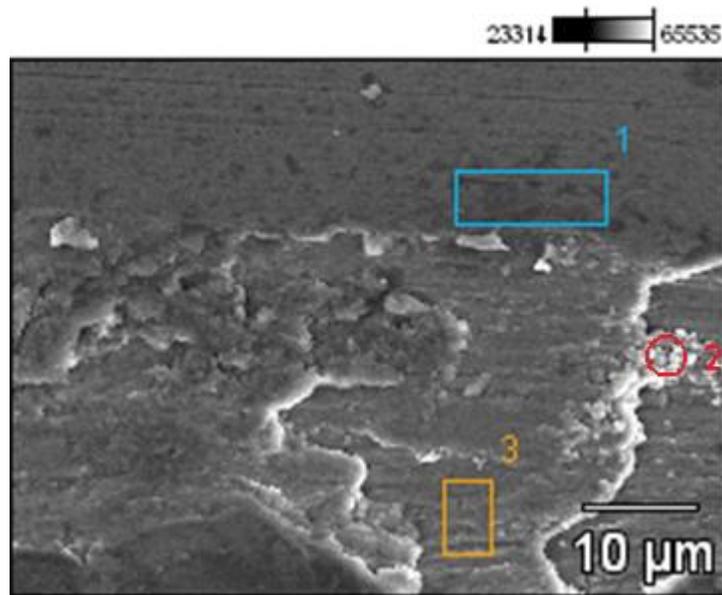


Figura 4.18; fotografía a una magnificación de 2000x de la muestra N°1 Estado sin carga. Análisis EDS

Full scale counts: 2186 Muestra 1 SC(3)_pt1

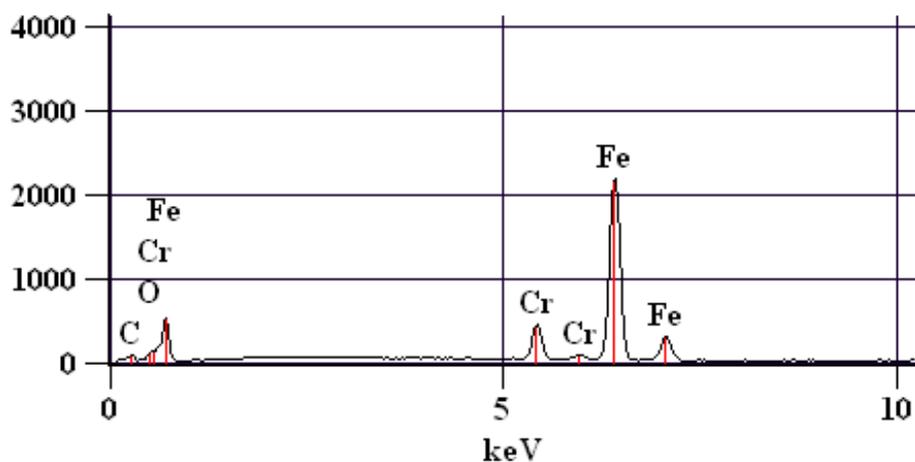


Grafico 4.14 Análisis espectroscópico punto 1 figura 4.18

Full scale counts: 1824 Muestra 1 SC(3)_pt2

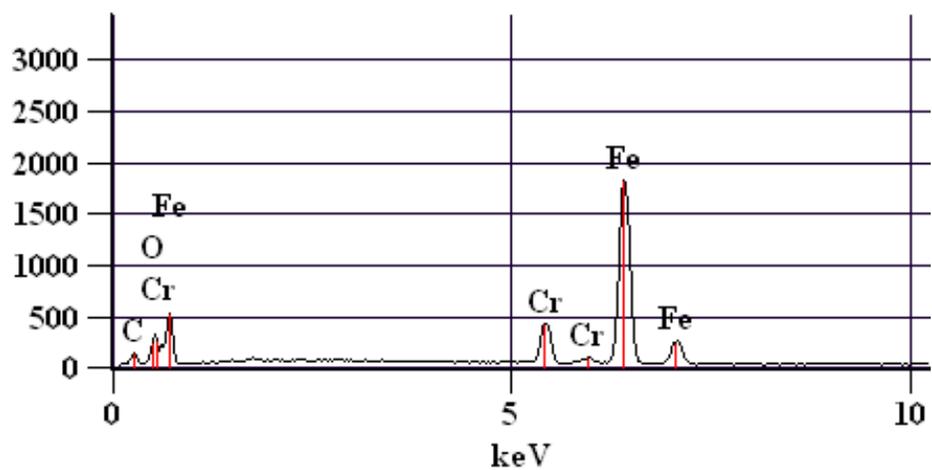


Grafico 4.15 Análisis espectroscópico punto 2 figura 4.18

Full scale counts: 2116 Muestra 1 SC(3)_pt3

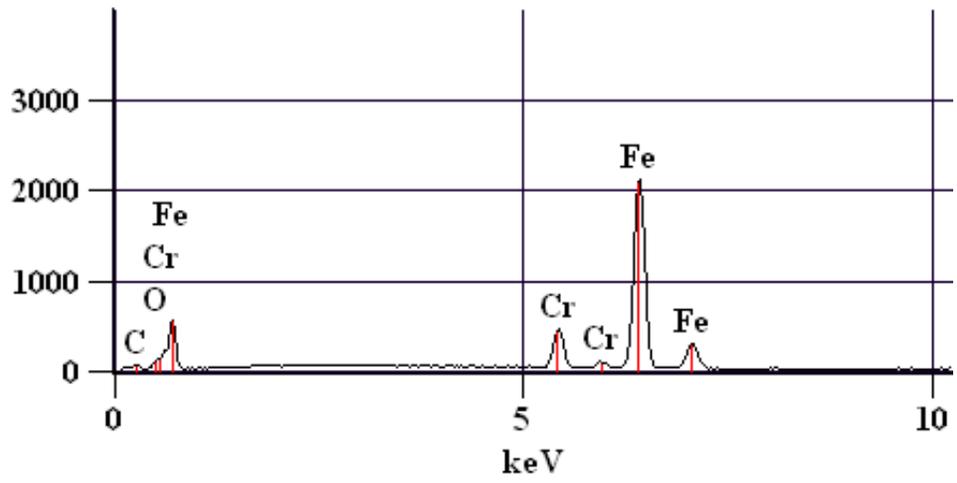


Grafico 4.16 Análisis espectroscópico punto 3 figura 4.18

CONCLUSIONES.

- La aplicación de cargas momentáneas que generen esfuerzos comprendidos dentro del dominio elástico, tienen influencia en la pérdida de material cuando éstos son sometidos a condiciones que impliquen desgaste.
- Los esfuerzos generados dentro del dominio elástico debido a cargas externas, tienen una influencia en la variación del número de dureza.
- La variación de la dureza mostró mayor influencia cuando las piezas en estudio se sometieron a cargas externas que producen un estado de esfuerzos de compresión en comparación con los esfuerzos de tracción.
- Se propone un modelo matemático para el cálculo del volumen desgastado en base a la ecuación propuesta por Archard, que da cuenta de la influencia de los esfuerzos en el material, a través de la variación del valor de dureza.

$$V = \frac{K * W * L}{H'(\sigma)} = \frac{K * W * L}{a * \sigma + H}$$

- El Programa Computacional basado en Elementos Finitos “ANSYS” resulto ser el método alternativo más acertado para la estimación de los esfuerzos producidos en la geometría de la probeta utilizada.
- El estado de esfuerzo generado en los especímenes de ensayo es variable, y aumenta a medida que se incrementa la profundidad de la huella de desgaste.

- Se demuestra que el coeficiente de desgaste dimensional (k) es un parámetro sensible dependiente de las condiciones del material y debe ser establecido experimentalmente.

RECOMENDACIONES

- A fin de validar el modelo matemático propuesto se recomienda ensayar con otros materiales y aceros.
- Estimar la factibilidad de un modelo matemático que tome en cuenta solo los esfuerzos en el rango elástico.
- Informarse sobre el funcionamiento y operación de la máquina de ensayos Falex Block on Ring (Bloque sobre anillo).
- Realizar mantenimiento preventivo a los rodamientos, correas y ejes, antes de la utilización de la máquina de ensayos Falex Block on Ring (Bloque sobre anillo).
- En el equipo de desgaste FALEX Alfa LFW-1 el eje de la maquina presenta una excentricidad que ocasiona que en el ensayo se presente vibraciones que pueden introducir variables no controladas.
- Utilizar el del Programa Computacional basado en Elementos Finitos “ANSYS” como herramienta para el cálculo de los esfuerzos producidos en el rango elástico de la geometría del bloque diseñada en este trabajo.
- Realizar mediciones de dureza (Cumpliendo con la norma ASTM E-92) variando en mayor proporción la magnitud del estado de esfuerzo, con la finalidad de obtener la relación existente del valor de dureza en función de los distintos estados de esfuerzos a los que se somete el espécimen.

- Al momento de poner en marcha el ensayo, hacer girar primero el eje de la maquina y luego colocar la carga seleccionada para la prueba para así evitar vibraciones producidas por efecto de la inercia de la carga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Metals (1992). Friction, Lubrication and wear technology. ASM Handbook, Vol. 18. ASM International. Estados Unidos de América.

Budynas-Nisbett. (2006). Shigley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition. Editorial: Mc Graw Hill.

Lujan, E y Di Girolamo, A. (2009). Influencia de los parámetros de rociado sobre la resistencia al desgaste de recubrimientos depositados por proyección térmica. Trabajo especial de grado. U.C.V Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas, Venezuela.

Marguitu, Dan B. (2001). Mechanical Engineer's Handbook. Academic Press. Estados Unidos de America.

Moros, Hernan y Ruiz, Heli (2010). Estudio de la influencia del estado de esfuerzo en el desgaste por deslizamiento sin lubricación, a través del ensayo bloque sobre anillo en aceros. Trabajo especial de grado. U.C.V Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas, Venezuela.

Norton, Roberth L. (1999) Diseño de Maquinas. Ciudad Juarez, México

Popov, E.P. (2000). Mecánica de sólidos. Pearson Educación. México.

Sandor, B.I. (1999). Mechanical Engineering Handbook. CRC Press LLC. Boca Raton. Estados Unidos de América.

Shigley, J. E. y Mitchell, L. D. (1985) Diseño en Ingeniería Mecánica, 4ta Edición. Ciudad Juarez, México

Stachowiak, G. W. y Batchelor, A. W. Engineering Tribology. Butterwoth-Heinemann

Stolarski, T.A. (1990). Tribology in Machine Design. Butterwoth-Heinemann.

Timoshenko, S. (1967). Resistencia de Materiales. Primera parte, teoría elemental y problemas. Espasa-Calpe. Madrid.

Wakelin, R. (1974). TRIBOLOGY: The friction, lubrication, and wear of moving parts. Industrial Unit of Tribology, University of Leeds, U.K.

Fuentes Electrónicas

Andrew, M. y Pranav, S. (2007) Onset of nanoscale wear of metallic implant materials: influence of surface residual stresses and contact loads [Resumen en línea] Department of Mechanical Engineering, Iowa State University, United States of America. Disponible: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=19084600> [Consulta: 2009, Diciembre 18]

Buciumeanu, M.¹, Crudu, I.², Palaghian, L.², Miranda, A.S.^{1,2}, Silva, F.S.¹ (2008) Influence of an additional elastic stress on dry wear behavior in reciprocating test [Resumen en línea] ¹Centre for Mechanical and Materials Technologies, University of Minho, School of Engineering, Portugal. ²Department of Machine Design, University "Dunarea de Jos" of Galat,

- Faculty of Mechanical Engineering, Rumania. Disponible: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=21556846> [Consulta: 2009, Noviembre 17].
- Cámara Argentina de Lubricantes. Tribología: La Ciencia y la Tecnología de la Lubricación, La Fricción y el Desgaste [Documento en línea] Disponible en <http://www.cal.org.ar> [Consulta: 2009, Noviembre 19].
- Ekberg, A. (1997). Wear – Some Notes. Departament of Solid Mechanics, Chalmers Univesity of Technology [Documento en línea] Disponible en www.am.chalmers.se/~anek/research/wear.pdf [Consulta: 2010, Febrero 02].
- González, Ana. (). Consideraciones sobre el desgaste desde la óptica de la complejidad [Documento en línea]. Disponible en: <http://www.sld.cu> [Consulta: 2009, Noviembre 19].
- SKF (2010) Lubricación hidrostática. [Página Web en Línea]. Disponible: <http://www.skf.com/> [Consulta: 2009, Enero 02]
- Spuzic, S., Strafford K. N., Subramanian C. y Green L. (1994). Influence of stress state on abrasive wear of steels [Resumen en línea] University South Australia The Levels, Gartrell School, Dep. Metallurgy, Australie Disponible: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=3510508> [Consulta: 2010, Enero 21]
- Toschi, F., Melandri C., Pinasco P., Roncari, E., Guicciardi S., y de Portu, G., (2003). Influence of residual stresses on the wear behavior of alumina/alumina-zirconia laminated composites [Resumen en línea]

National Research Council (CNR), Institute of Science and Technology for Ceramics (ISTEC), Italia. Disponible: [http:// www3. interscience. wiley. com/ journal/ 118861639/ abstract](http://www3.interscience.wiley.com/journal/118861639/abstract) [Consulta: 2010, Enero 23]

Williams, J. A. (1999) Wear modeling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach [Documento en línea] Cambridge University Engineering Departament. Disponible: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164899000605> [Consulta: 12 de Enero de 2010]

Fuentes de Tipo Legal

Tribología: La Ciencia y la Tecnología de la Lubricación, La Fricción y el Desgaste. (1994). Cámara Argentina de Lubricantes. Buenos Aires, Argentina.

Standard Test Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine. (ASTM D 2714). (2003). ASTM International.

ASTM G77 Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test. (1998). ASTM International.

ASTM A370 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. (2003). ASTM International.

ASTM E92 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials. (2003). ASTM International.

ASTM E8 Standard Test Methods for tension Testing of Metallic Materials.
(2003). ASTM International.

Tribology (Historical Review) (2006) Tribology & Lubrication Technology.
London, United Kingdom

ANEXOS

Anexo A

Calculo del volumen teórico máximo en función de la profundidad de desgaste

Dado que la superficie de contacto en el bloque es variable respecto al anillo a medida que avanza el ensayo, el área (A) de la superficie en contacto y el volumen desgastado en función de la distancia de penetración en el bloque son calculados según la norma ASTM G 77-98:

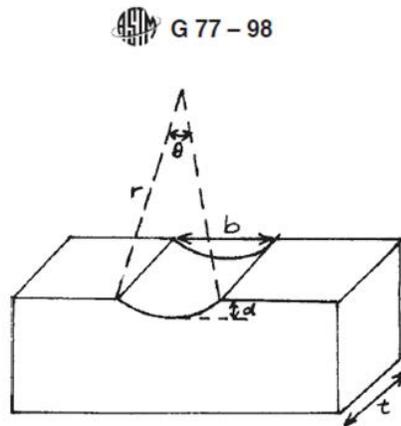


Figura 3.20. Dimensiones utilizadas en el calculo del volumen desgastado en el bloque

$t =$ ancho de bloque, mm

$r =$ radio del anillo, mm

$D = 2r =$ diametro del anillo, mm

$b =$ ancho de huella, mm

$\theta =$ angulo de huella, rad

$d =$ profundidad de desgaste, mm

$$b = 2 * \sqrt{r^2 - (r - d)^2} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\theta = 2 * \sin^{-1} \frac{b}{D} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\text{Area de contacto} = \theta * r * t \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\text{Volumen desgastado} = D^2 * \frac{t}{8} * (\theta - \sin \theta) \quad (\text{Ec. 4})$$

De esta manera tenemos que el volumen de desgaste (V) no deberá exceder:

Ancho de huella,

$$b = 2 * \sqrt{17,945^2 - (17,945 - 1,5)^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$b = 14,1753 \text{ mm}$$

Angulo de huella,

$$\theta = 2 * \sin^{-1} \frac{b}{34,99}$$

$$\theta = 0,8342 \text{ rad}$$

Área de contacto del par tribológico,

$$\text{Area de contacto} = \theta * 17,945 * 6,35$$

$$\text{Area de contacto} = 92,6774 \text{ mm}^2$$

Volumen desgastado,

$$\text{Volumen desgastado} = 34,99 * \frac{2}{8} * (\theta - \sin \theta)$$

$$\text{Volumen desgastado} = 90,8145 \text{ mm}^3$$

Anexo B**Calculo de las presiones en contacto del par tribológico al final y el comienzo del ensayo**

El cálculo de esta presión nos ayuda a identificar en el mapa de mecanismo de desgaste que tipo de desgaste se está produciendo en el par tribológico al comienzo de la prueba.

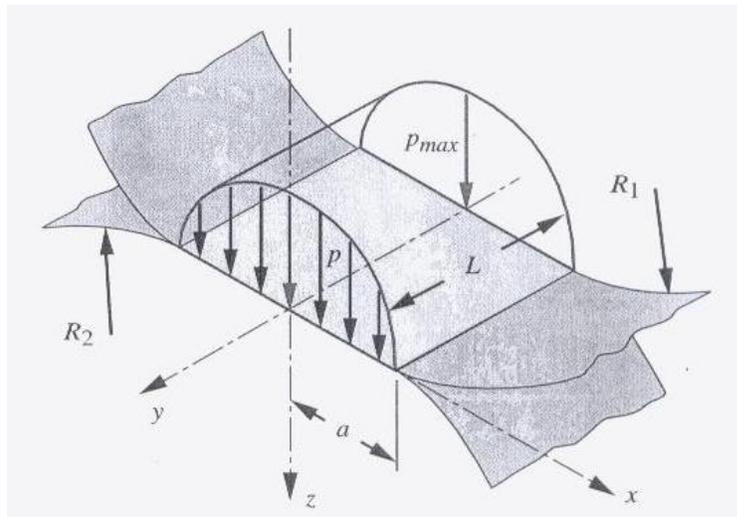


Figura 3.22 Distribución de presiones de prisma elipsoidal en contacto cilíndrico

Donde:

R_1 = Radio del bloque

R_2 = Radio del anillo

P_{max} = Presion maxima

$L =$ Ancho del bloque

$a =$ semiancho de la huella de contacto

El semiancho a , se calcula mediante

$$a = \sqrt{\frac{2 * (m_1 + m_2) * F}{\pi * B * L}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

m_1 y m_2 son constantes del material y en este caso como el conjunto anillo-bloque son del mismo material $m_1 = m_2$ y se determina

$$m_1 = m_2 = \frac{(1 - \nu^2)}{E} \quad (\text{Ec. 7})$$

$\nu =$ Modulo de poisson del material

E (Pa) = Modulo de young del material

F (N) = Fuerza que mantiene en contacto al par tribologico

L (m) = Ancho del bloque

B (1/m) = Constante geometrica cilindrica

Esta constante B depende de los radios de los cilindros,

$$B = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

La presión máxima producida en el contacto al comienzo del ensayo se calcula mediante:

$$P_{max} = \frac{2 * F}{\pi * a * L} \quad (\text{Ec. 9})$$

El Área de contacto inicial,

$$\text{Area de contacto inicial} = 2a * L \quad (\text{Ec. 10})$$

La Presión promedio,

$$P_{prom} = \frac{F}{\text{Area de contacto inicial}} \quad (\text{Ec. 11})$$

Todas estas variables se calcularon arrojando los siguientes resultados,

Constante geométrica cilíndrica,

$$B = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{0} + \frac{1}{3,5x10^{-2}} \right)$$

$$B = 14,3 \text{ 1/m}$$

Constante del material,

$$m_1 = m_2 = \frac{1 - 0,3^2}{207x10^9}$$

$$m_1 = m_2 = 4,40x10^{-12}$$

Semiancho de la huella de contacto,

$$a = \sqrt{\frac{4 * (4,40 \times 10^{-12}) * 111,2}{\pi * 14,3 * 6,35 \times 10^{-3}}}$$

$$a = 8,28 \times 10^{-5} \text{ m}$$

Presión máxima,

$$P_{max} = \frac{2 * F}{\pi * a * L}$$

$$P_{max} = \frac{2 * 111,2}{\pi * 8,28 \times 10^{-5} * 6,35 \times 10^{-3}}$$

$$P_{max} = 134,61 \text{ N/mm}^2$$

El Área de contacto inicial,

$$\text{Area de contacto inicial} = 2 * 8,28 \times 10^{-5} * 6,35 \times 10^{-3}$$

$$\text{Area de contacto inicial} = 1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\text{Area de contacto inicial} = 1,05 \text{ mm}^2$$

La Presión promedio,

$$P_{prom} = \frac{F}{\text{Area de contacto inicial}}$$

$$P_{prom} = \frac{111,2}{1,05}$$

$$P_{prom} = 105,7 \text{ N/mm}^2$$

Presión al final del ensayo,

$$P_{minima} = \frac{W}{A_{max}} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$P_{minima} = \frac{111,2}{92,67}$$

$$P_{minima} = 1,19 \text{ N/mm}^2$$

Anexo C**Cálculo del Volumen de Desgaste a través de la Formula de Archard.****Acero AISI O1**

$$k \text{ AISI O1} = 1,79 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{N} * \text{m}$$

W [N]	44,48	66,72	88,96	111,20	133,44	155,68
W [Lbf]	10	15	20	25	30	35

L [m]	K*L [mm ³ /N]	V [mm ³]					
		200	3,57E-01	15,89	23,83	31,78	39,72
250	4,47E-01	19,86	29,79	39,72	49,66	59,59	69,52
300	5,36E-01	23,83	35,75	47,67	59,59	71,50	83,42
350	6,25E-01	27,81	41,71	55,61	69,52	83,42	97,32
400	7,14E-01	31,78	47,67	63,56	79,45	95,34	111,23
450	8,04E-01	35,75	53,63	71,50	89,38	107,26	125,13
500	8,93E-01	39,72	59,59	79,45	99,31	119,17	139,03
550	9,82E-01	43,70	65,54	87,39	109,24	131,09	152,94
600	1,07E+00	47,67	71,50	95,34	119,17	143,01	166,84
650	1,16E+00	51,64	77,46	103,28	129,10	154,92	180,75
700	1,25E+00	55,61	83,42	111,23	139,03	166,84	194,65
750	1,34E+00	59,59	89,38	119,17	148,97	178,76	208,55
800	1,43E+00	63,56	95,34	127,12	158,90	190,68	222,46
850	1,52E+00	67,53	101,30	135,06	168,83	202,59	236,36
900	1,61E+00	71,50	107,26	143,01	178,76	214,51	250,26
950	1,70E+00	75,48	113,21	150,95	188,69	226,43	264,17
1000	1,79E+00	79,45	119,17	158,90	198,62	238,35	278,07
1050	1,88E+00	83,42	125,13	166,84	208,55	250,26	291,97
1100	1,96E+00	87,39	131,09	174,79	218,48	262,18	305,88
1150	2,05E+00	91,37	137,05	182,73	228,41	274,10	319,78
1200	2,14E+00	95,34	143,01	190,68	238,35	286,01	333,68
1250	2,23E+00	99,31	148,97	198,62	248,28	297,93	347,59
1300	2,32E+00	103,28	154,92	206,57	258,21	309,85	361,49
1350	2,41E+00	107,26	160,88	214,51	268,14	321,77	375,39
1400	2,50E+00	111,23	166,84	222,46	278,07	333,68	389,30

Nota: k = coeficiente dimensional de desgaste; L = longitud recorrida en el ensayo ; W = es la carga neta aplicada; V = volumen de desgaste calculado mediante la fórmula de Archard $V = K \cdot l \cdot \frac{W}{H} = k \cdot l \cdot W$, donde K es el coeficiente adimensional de desgaste

Anexo D**Cálculo del Volumen de Desgaste a través de la Formula de Archard.****Acero AISI 4140**

$$k \text{ AISI 4140} = 1,06 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / N * m$$

W [N]	44,48	66,72	88,96	111,20	133,44	155,68
W [Lbf]	10	15	20	25	30	35

L [m]	K*L [mm ³ /N]	V [mm ³]					
		200	2,12E-01	9,41	14,11	18,82	23,52
250	2,64E-01	11,76	17,64	23,52	29,40	35,29	41,17
300	3,17E-01	14,11	21,17	28,23	35,29	42,34	49,40
350	3,70E-01	16,47	24,70	32,93	41,17	49,40	57,63
400	4,23E-01	18,82	28,23	37,64	47,05	56,46	65,87
450	4,76E-01	21,17	31,76	42,34	52,93	63,51	74,10
500	5,29E-01	23,52	35,29	47,05	58,81	70,57	82,33
550	5,82E-01	25,88	38,81	51,75	64,69	77,63	90,57
600	6,35E-01	28,23	42,34	56,46	70,57	84,68	98,80
650	6,87E-01	30,58	45,87	61,16	76,45	91,74	107,03
700	7,40E-01	32,93	49,40	65,87	82,33	98,80	115,27
750	7,93E-01	35,29	52,93	70,57	88,21	105,86	123,50
800	8,46E-01	37,64	56,46	75,28	94,09	112,91	131,73
850	8,99E-01	39,99	59,99	79,98	99,98	119,97	139,97
900	9,52E-01	42,34	63,51	84,68	105,86	127,03	148,20
950	1,00E+00	44,69	67,04	89,39	111,74	134,08	156,43
1000	1,06E+00	47,05	70,57	94,09	117,62	141,14	164,67
1050	1,11E+00	49,40	74,10	98,80	123,50	148,20	172,90
1100	1,16E+00	51,75	77,63	103,50	129,38	155,26	181,13
1150	1,22E+00	54,10	81,16	108,21	135,26	162,31	189,37
1200	1,27E+00	56,46	84,68	112,91	141,14	169,37	197,60
1250	1,32E+00	58,81	88,21	117,62	147,02	176,43	205,83
1300	1,37E+00	61,16	91,74	122,32	152,90	183,48	214,06
1350	1,43E+00	63,51	95,27	127,03	158,78	190,54	222,30
1400	1,48E+00	65,87	98,80	131,73	164,67	197,60	230,53

Nota: k = coeficiente dimensional de desgaste; L = longitud recorrida en el ensayo ; W = es la carga neta aplicada; V = volumen de desgaste calculado mediante la fórmula de Archard $V = K \cdot l \cdot \frac{W}{H} = k \cdot l \cdot W$, donde K es el coeficiente adimensional de desgaste

Anexo E**Cálculo del Volumen de Desgaste a través de la Formula de Archard.****Acero AISI D3**

$$k \text{ AISI D3} = 1,47 \times 10^{-3} \text{ mm}^3 / \text{N} * \text{m}$$

		W [N]	44,48	66,72	88,96	111,20	133,44	155,68
		W						
		[Lbf]	10	15	20	25	30	35
		K*L						
L [m]	[mm ³ /N]	V [mm ³]						
200	2,94E-01	13,07	19,61	26,14	32,68	39,21	45,75	
250	3,67E-01	16,34	24,51	32,68	40,85	49,02	57,19	
300	4,41E-01	19,61	29,41	39,21	49,02	58,82	68,62	
350	5,14E-01	22,87	34,31	45,75	57,19	68,62	80,06	
400	5,88E-01	26,14	39,21	52,28	65,36	78,43	91,50	
450	6,61E-01	29,41	44,11	58,82	73,52	88,23	102,93	
500	7,35E-01	32,68	49,02	65,36	81,69	98,03	114,37	
550	8,08E-01	35,95	53,92	71,89	89,86	107,84	125,81	
600	8,82E-01	39,21	58,82	78,43	98,03	117,64	137,25	
650	9,55E-01	42,48	63,72	84,96	106,20	127,44	148,68	
700	1,03E+00	45,75	68,62	91,50	114,37	137,25	160,12	
750	1,10E+00	49,02	73,52	98,03	122,54	147,05	171,56	
800	1,18E+00	52,28	78,43	104,57	130,71	156,85	182,99	
850	1,25E+00	55,55	83,33	111,10	138,88	166,66	194,43	
900	1,32E+00	58,82	88,23	117,64	147,05	176,46	205,87	
950	1,40E+00	62,09	93,13	124,17	155,22	186,26	217,31	
1000	1,47E+00	65,36	98,03	130,71	163,39	196,07	228,74	
1050	1,54E+00	68,62	102,93	137,25	171,56	205,87	240,18	
1100	1,62E+00	71,89	107,84	143,78	179,73	215,67	251,62	
1150	1,69E+00	75,16	112,74	150,32	187,90	225,47	263,05	
1200	1,76E+00	78,43	117,64	156,85	196,07	235,28	274,49	
1250	1,84E+00	81,69	122,54	163,39	204,23	245,08	285,93	
1300	1,91E+00	84,96	127,44	169,92	212,40	254,88	297,37	
1350	1,98E+00	88,23	132,34	176,46	220,57	264,69	308,80	
1400	2,06E+00	91,50	137,25	182,99	228,74	274,49	320,24	

Nota: k = coeficiente dimensional de desgaste; L = longitud recorrida en el ensayo ; W = es la carga neta aplicada; V = volumen de desgaste calculado mediante la fórmula de Archard $V = K \cdot l \cdot \frac{W}{H} = k \cdot l \cdot W$, donde K es el coeficiente adimensional de desgaste

Anexo F**Masa perdida en el bloque en el ensayo de desgaste Bloque sobre Anillo.**

Nota: S representa la desviación estándar

Masa Desgastada [gr] de Acero AISI D3			
Bloque	Sin Carga	Esfuerzo de Compresión	Esfuerzo de Tracción
1	0,7425	0,7071	0,8018
2	0,7598	0,7021	0,8118
3	0,7478	0,7063	0,8039
4	0,7439	0,7133	0,8115
5	0,7963	0,6980	0,8211
Promedio	0,75806	0,7054	0,8100
S	0,061	0,0480	0,049

Masa Desgastada [gr] de Acero AISI O1			
Bloque	Sin Carga	Esfuerzo de Compresión	Esfuerzo de Tracción
1	0,7314	0,6667	0,7597
2	0,7109	0,6683	0,7579
3	0,7592	0,6802	0,7499
4	0,7202	0,6891	0,7624
5	0,7252	0,6868	0,7686
Promedio	0,72938	0,6782	0,7597
S	0,055	0,0570	0,066

Masa Desgastada [gr] de Acero AISI 4140			
Bloque	Sin Carga	Esfuerzo de Compresión	Esfuerzo de Tracción
1	0,7425	0,7071	0,8018
2	0,7598	0,7021	0,8118
3	0,7478	0,7063	0,8039
4	0,7439	0,7133	0,8115
5	0,7963	0,6980	0,8211
Promedio	0,75806	0,7054	0,8100
S	0,073	0,0670	0,0063

Anexo G

Coefficiente Adimensional de Desgaste.

En el cuadro siguiente se presenta el valor del coeficiente de adimensional de desgaste real de cada uno de los aceros ensayados

Material	K
AISI O1	3,58E-03
AISI D3	3,72E-03
AISI 4140	3,51E-03

Al comparar los valores presentados en la tabla anterior con el valor teórico del coeficiente adimensional de desgaste ($K=3,5E-03$) reportan una variación porcentual de 2,29%, 6,29% y 2,86% para los aceros AISI O1, AISI D3 Y AISI 4140, respectivamente.