

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL ACERO AISI 4340 BAJO CONDICIONES DE DESLIZAMIENTO SIN LUBRICACIÓN**

TUTOR ACADÉMICO: Prof Pedro V. Cadenas H.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs Cubillán T., Alfredo  
Liccionis F., Oscar  
Para optar al título  
de ingeniero mecánico

**CARACAS, 2002**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por ser la luz que nos guía iluminando los mejores senderos de la vida, tanto en los momentos de felicidad como en los momentos de dificultad.

A mis abuelos, que Dios los tenga en su gloria.

A mis padres, como el mejor ejemplo de orgullo que les puedo dar.

A mi hermana Itala, por su apoyo constante e incondicional y de velar por el bienestar en todos los aspectos de mi vida.

A mis hermanos, Alberto, Armando, Nancy y José Luis siempre me han dado su confianza y fuerza moral.

**Alfredo A. Cubillán T.**

## DEDICATORIA

En primer lugar a Dios, quien me ayudó a seguir adelante en los momentos difíciles y siempre estuvo a mi lado.

A mi MADRE, de quien no puedo expresar palabras suficientes para indicar todo lo que es y significa para mí. De verdad gracias eternas.

A mi Padre, quien hizo todo lo que estuvo a su alcance para que yo pudiera llegar hasta aquí y que sin embargo ahora no podrá disfrutar de éste, su logro.

A mis hermanos Eric y Hernán, quienes han sido bastiones de mi vida y de este triunfo personal.

A mi tía Luisa Fuentes, quien ha sido una segunda madre para mí, con toda las responsabilidades, satisfacciones y sufrimientos que eso conlleva.

A mis sobrinas Bárbara, Serena y a mi sobrino Samuel, a quienes considero casi como mis hijos.

**Oscar R. Liccionis F.**

## AGRADECIMIENTOS

Al tutor académico profesor Pedro Cadenas, por su valiosa orientación y colaboración para la consecución del cumplimiento de los objetivos propuestos de este trabajo de grado.

A la Doctora Sibyl Lorena Caballero perteneciente al Departamento de Planificación Estratégica de PDVSA-INTEVEP, por sus buenos oficios para la realización del trabajo de microscopía electrónica.

A la Doctora Zoraida Hernández perteneciente al Laboratorio de Análisis Químico Inorgánico de PDVSA-INTEVEP, por prestarnos su valiosa colaboración en la obtención del trabajo de microscopía electrónica.

Al Ingeniero Profesor Cesar Ferrer, Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por permitirnos el uso del laboratorio de Lubricación y Desgaste y de los materiales presentes en el laboratorio para la exitosa realización de este Trabajo Especial de Grado.

A los Ingenieros; Profesores Orlando Reyes, Juan Carlos Mestre , Arturo Gil, Jesús Bello y Juvenal Caraballo pertenecientes a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su valiosa colaboración en la consecución del trabajo especial de grado.

Al Ingeniero Gerardo Trotta Secretario Ejecutivo de la Fundación Luis Caballero Mejías, por sus buenos oficios para la realización del trabajo de mecanizado de las probetas requeridas en los ensayos.

A los Ingenieros y Técnicos del Laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, por su valiosa y oportuna colaboración. Especialmente a Eduardo, Carlos, Víctor y Marlon.

A los Técnicos del Taller de Máquinas-Herramientas de la Escuela de Ingeniería Mecánica: Araque, Sandoval, Joel y Ronald, por su importante colaboración en el trabajo de mecanizado de las probetas requeridas en los ensayos.

A la licenciada María A. Padrón, por su valiosa ayuda para la obtención de información bibliográfica y posteriormente en la redacción y presentación del Trabajo Especial de Grado

A todos Ustedes, ¡Muchas Gracias!.

**Oscar R. Liccionis F. y Alfredo A. Cubillán T.**

**INDICE GENERAL**

|  | página |
|--|--------|
| Dedicatoria  | ii     |
| Agradecimientos  | iv     |
| Índice General   | vi     |
| Índice de Figuras  | xi     |
| Índice de Tablas   | xiii   |
| Resumen  | xiv    |
| <br>   |        |
| <b>CAPITULO I. INTRODUCCIÓN</b>                          |        |
| 1.1. Introducción  | 2      |
| 1.2. Planteamiento del problema                          | 10     |
| 1.3. Objetivos del trabajo                               | 11     |
| 1.3.1. Objetivo general                                  | 11     |
| 1.3.2. Objetivos específicos                             | 11     |
| 1.4. Justificación de la investigación                   | 12     |
| <br>   |        |
| <b>CAPITULO II. FUNDAMENTO TEORICO</b>                   |        |
| 2.1. Definición del desgaste                             | 15     |
| 2.2. La Adhesión conceptos básicos (Desgaste deslizante) | 16     |
| 2.3. Medición de la fricción                             | 22     |
| 2.4. Tribográficas                                       | 22     |
| 2.4.1. Curva maestra Fricción-Tiempo                     | 23     |
| 2.4.2. Curva maestra Desgaste-Tiempo                     | 25     |
| 2.5. Mecanismos de desgaste                              | 26     |
| 2.5.1. Desgaste adhesivo                                 | 27     |
| 2.5.2. Desgaste abrasivo                                 | 28     |

|  |    |
|--|----|
| 2.5.3. Desgaste por erosión  | 29 |
| 2.5.4. Desgaste por fatiga   | 30 |
| 2.5.5. Desgaste por corrosión  | 30 |
| 2.5.6. Otros mecanismos  | 30 |
| 2.6. Clasificación del desgaste  | 31 |
| 2.6.1. Diferencias entre el desgaste suave y el desgaste severo                | 32 |
| 2.7. Teorías sobre el desgaste deslizante de aceros en ausencia de lubricantes | 35 |
| 2.7.1. Teoría de adhesión  | 35 |
| 2.7.2. Teoría de la delaminación   | 37 |
| 2.7.3. Teorías relacionadas con mecánica de fractura y teoría de dislocaciones | 39 |
| 2.7.4. Teorías relacionadas con fatiga   | 40 |
| 2.7.5. Teoría del desgaste oxidativo   | 42 |
| 2.7.6. Teoría del deterioro cíclico  | 44 |
| 2.7.7. Otras teorías   | 44 |
| 2.8. Efectos de las variables más importantes                                  | 45 |
| 2.8.1. Carga normal  | 45 |
| 2.8.2. Distancia deslizada o tiempo  | 47 |
| 2.8.3. Velocidad de deslizamiento  | 50 |
| 2.9. Otros factores  | 51 |
| 2.9.1. Dureza  | 51 |
| 2.9.2. <i>Área aparente de contacto</i>  | 53 |
| 2.9.3. Contenido de carbono y de otros elementos de aleación                   | 54 |
| 2.9.4. Microestructura   | 55 |
| 2.9.5. Efectos ambientales   | 57 |
| 2.9.6. Rugosidad de las superficies en contacto                                | 57 |
| 2.10. Estudios más recientes   | 59 |

**CAPITULO III. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Selección de Materiales                    | 63 |
| 3.1.1. Características del Acero AISI 4340      | 63 |
| 3.1.2. Usos y Aplicaciones                      | 64 |
| 3.1.3. Características Físicas                  | 64 |
| 3.1.4. Características Acero AISI D-2           | 64 |
| 3.1.5. Usos y Aplicaciones                      | 64 |
| 3.1.6. Características Físicas                  | 65 |
| 3.2 Mecanizado de las Piezas                    | 65 |
| 3.3. Procedimiento para los Ensayos de Desgaste | 66 |
| 3.3.1. Limpieza de las Piezas                   | 66 |
| 3.3.2. Descripción del Equipo                   | 67 |
| 3.4. Parámetros del Ensayo                      | 70 |
| 3.5. Ensayos de Dureza                          | 71 |
| 3.6. Procedimientos de Cálculo y Reportes.      | 72 |
| 3.6.1. Volumen de Desgaste.                     | 72 |
| 3.6.2. Tasa de Desgaste.                        | 72 |
| 3.6.3. Coeficiente Específico de Desgaste.      | 73 |
| 3.6.4. Coeficiente de Fricción                  | 74 |
| 3.6.5. Esfuerzos de Contacto (Hertzianos)       | 74 |

**CAPITULO IV. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS**

|   |    |
|---|----|
| 4.1. Resultados Obtenidos   | 78 |
| 4.1.1. Resultados Experimentales  | 78 |
| 4.1.2. Resultados Calculados  | 83 |
| 4.2. Análisis de resultados   | 85 |
| 4.2.1. Efecto de la velocidad de deslizamiento sobre el coeficiente de fricción | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2.2. Efecto de la carga aplicada sobre el coeficiente de fricción | 89  |
| 4.2.3. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del bloque      | 95  |
| 4.2.4. Efecto de la velocidad sobre la Tasa de Desgaste del bloque  | 97  |
| 4.2.5. Efecto de la carga sobre la temperatura                      | 99  |
| 4.2.6. Efecto de la velocidad sobre la temperatura                  | 101 |
| 4.2.7. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del anillo      | 103 |
| 4.2.8. Efecto de la velocidad sobre la tasa de desgaste del anillo  | 104 |
| 4.3. Régimen de desgaste  | 105 |
| 4.4. Mecanismos de desgaste   | 107 |
| 4.4.1. Efecto de la velocidad                                       | 107 |
| 4.4.2. Efecto de la carga   | 109 |

## **CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 5.1. Conclusiones    | 113 |
| 5.2. Recomendaciones | 116 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> | <b>117</b> |
|-----------------------------------|------------|

## **ANEXOS**

### **ANEXOS A: GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCION VS. DISTANCIA PARA VALORES DE CARGA APLICADA CONSTANTE**

- A-1: Para 44.5N
- A-2: Para 89.0N
- A-3: Para 133.5N
- A-4: Para 178.0N

### **ANEXOS B: GRAFICAS TEMPERATURA VS. DISTANCIA PARA VALORES DE CARGA APLICADA CONSTANTE**

- B-1: Para 44.5N
- B-2: Para 89.0N

B-3: Para 133.5N

B-4: Para 178.0N

**ANEXOS C: GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCION VS. DISTANCIA PARA VALORES DE VELOCIDAD CONSTANTE**

C-1: Para 0.1m/s

C-2: Para 0.2m/s

C-3: Para 0.4m/s

C-4: Para 0.6m/s

**ANEXOS D: GRAFICAS TEMPERATURA VS. DISTANCIA PARA VALORES DE VELOCIDAD CONSTANTE**

D-1: Para 0.1m/s

D-2: Para 0.2m/s

D-3: Para 0.4m/s

D-4: Para 0.6m/s

**ANEXO E: GRAFICA LOGARITMO DE TASA DE DESGASTE VS. LOGARITMO DE CARGA APLICADA PARA VALORES DE VELOCIDAD CONSTANTE**

**ANEXOS F: GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCIÓN PROMEDIO VS. DISTANCIA**

F-1: : Para velocidad de deslizamiento constante

F-2: : Para carga aplicada constante

**ANEXOS G: GRAFICAS TEMPERATURA PROMEDIO VS. DISTANCIA**

G-1: : Para velocidad de deslizamiento constante

G-2: : Para carga aplicada constante

**ANEXOS H: PLANOS**

H-1: Bloque

H-2: Anillo

**ANEXO I: MICROFOTOGRAFÍAS DE PARES TRIBOLÓGICOS**

## INDICE DE FIGURAS

| <b>FIGURA:</b>   | <b>Pagina</b> |
|--|---------------|
| 1.1: Sistemas de rodadura más importantes  | 3             |
| 2.1: Representación esquemática de un mecanismo clásico de adhesión para la generación de una partícula irregular de desgaste  | 20            |
| 2.2: Representación esquemática de un mecanismo para producir una partícula irregular de desgaste  | 21            |
| 2.3: Configuración Pin on disc   | 22            |
| 2.4: Curva maestra coeficiente de Fricción-Tiempo  | 24            |
| 2.5: Curva maestra Desgaste-Tiempo   | 25            |
| 2.6: Adhesión  | 27            |
| 2.7: Abrasión entre dos cuerpos  | 28            |
| 2.8: Abrasión entre tres cuerpos   | 28            |
| 2.9: Desgaste por erosión  | 29            |
| 2.10: Desgaste micro-oscilatorio (“Fretting”)  | 31            |
| 2.11: Gráfica de tasa de desgaste y resistencia eléctrica de contacto para un seguidor de latón al plomo deslizando contra un anillo de material de stellita endurecida como una función de la carga normal aplicada | 33            |
| 2.12: Representación esquemática para la formación de una partícula de desgaste por delaminación   | 38            |
| 2.13: Patrón característico de desgaste de aceros(Desgaste severo)   | 48            |
| 2.14: Patrón característico de desgaste de aceros(Desgaste suave)  | 49            |
| 2.15: Efecto de la oxidación en el desgaste  | 49            |
| 2.16: Influencia de la dureza en la tasa de desgaste de acero con 1.0% C, 2.0% Si, 4.0% Cr, 2.5% Mo, 1.0% V y 0.3% W, estudiado por Kasak y Neumeyer   | 52            |
| 2.17: Desgaste de un seguidor de cobre contra un anillo rotatorio de acero SAE 1045. Aire seco, $F_n = 20 \text{ N}$ , $V = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$   | 54            |
| 2.18: Influencia de la dureza en la resistencia al desgaste abrasivo   | 55            |
| 3.1: Configuración bloque sobre anillo (block on ring)   | 63            |

|   |     |
|---|-----|
| 3.2: Esquema de la máquina Falex alfa LFW-1, máquina de ensayo para fricción y desgaste                                   | 68  |
| 4.1: Gráfica de coeficiente de fricción promedio $f$ contra velocidad de deslizamiento $V$                                | 85  |
| 4.2: Gráfica coeficiente de fricción contra distancia deslizada para la categoría de 89N de carga aplicada                | 87  |
| 4.3: Gráfica de Coeficiente de fricción promedio $f$ contra carga aplicada $F_n$  | 89  |
| 4.4: Gráfica coeficiente de fricción contra distancia deslizada para la categoría de 0.1m/s de velocidad de deslizamiento | 93  |
| 4.5: Gráfica coeficiente de fricción contra distancia deslizada para la categoría de 0.6m/s de velocidad de deslizamiento | 93  |
| 4.6: Gráfica de la Tasa de Desgaste promedio T.D en los bloques contra Carga aplicada $F_n$                               | 96  |
| 4.7: Gráfica de Tasa de desgaste promedio sobre los bloques T.D contra velocidad de deslizamiento $V$                     | 98  |
| 4.8: Gráfica de temperatura promedio $T$ contra carga aplicada $F_n$  | 100 |
| 4.9: Gráfica de temperatura promedio $T$ del bloque contra velocidad de deslizamiento $V$                                 | 102 |
| 4.10: Gráfica de la tasa de desgaste T.D promedio de los anillos contra carga aplicada                                    | 103 |
| 4.11: Gráfica de la tasa de desgaste T.D promedio de los anillos contra velocidad de deslizamiento $V$                    | 105 |
| 4.12: Huella desgastada del anillo (MEB 300X). $F_n=44.5N$ ; $V=0.6m/s$   | 108 |
| 4.13: Huella desgastada del anillo (MEB 300X). $F_n = 44.5N$ ; $V = 0.2m/s$   | 108 |
| 4.14: Huella desgastada del bloque (MEB 300X). $F_n=44.5N$ ; $V= 0.2m/s$  | 109 |
| 4.15: Huella desgastada del bloque (MEB 300X). $F_n=133,5N$ ; $V = 0,2m/s$  | 110 |

## INDICE DE TABLAS

| <b>TABLA:</b>   | <b>pagina</b> |
|---|---------------|
| 1.1: Clasificación de los parámetros que afectan a un tribosistema  | 4             |
| 2.1 Coeficientes de fricción $f$ típicos, sin lubricación para materiales a baja<br>velocidad en atmósfera normal desgastados contra aceros suaves. | 19            |
| 2.2: Tipos de desgaste según la importancia relativa que tienen en la industria   | 26            |
| 2.3: Diferencia entre desgaste suave y desgaste severo  | 31            |
| 2.4: Valores típicos de coeficientes de desgaste $k$ con deslizamiento en seco.   | 34            |
| 3.1. Composición química del acero AISI 4340  | 63            |
| 3.2. Composición química del acero AISI D-2   | 64            |
| 3.3: Esfuerzos de contacto  | 76            |
| 4.1: Resultados obtenidos experimentalmente Carga = 44.5 N  | 79            |
| 4.2: Resultados obtenidos experimentalmente Carga = 89 N  | 79            |
| 4.3: Resultados obtenidos experimentalmente Carga = 133.5 N   | 80            |
| 4.4: Resultados obtenidos experimentalmente Carga = 178 N   | 80            |
| 4.5: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.1m/s  | 81            |
| 4.6: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.2m/s  | 81            |
| 4.7: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.4m/s  | 82            |
| 4.8: Resultados obtenidos experimentalmente velocidad = 0.6m/s  | 82            |
| 4.9: Resultados calculados bloques material AISI 4340 para rango de carga   | 83            |
| 4.10: Resultados calculados bloques material AISI 4340 para rango de velocidad  | 83            |
| 4.11: Resultados calculados anillos material AISI D-2 para rango de carga   | 84            |
| 4.12: Resultados calculados anillos material AISI D2 para rango de velocidad  | 84            |

**Cubillán T., Alfredo A., / y / Liccionis F., Oscar R.**

## **ESTUDIO DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DEL ACERO AISI 4340 BAJO CONDICIONES DE DESLIZAMIENTO SIN LUBRICACIÓN**

**Tutor Académico: Prof. Cadenas H. Pedro V. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería.  
Escuela de Ingeniería Mecánica. 2002. 123 pág.**

Desgaste, lubricación, bloque sobre anillo, adhesión.

En el presente trabajo se estudiaron los efectos de la carga normal y la velocidad de deslizamiento, sobre el desgaste deslizante del par tribológico AISI 4340 y AISI D-2, empleando un tribómetro en la configuración geométrica bloque sobre anillo (“Block on Ring”), según norma ASTM D2714-88. Todos los ensayos se realizaron al aire y en ausencia de lubricantes. Las cargas normales aplicadas fueron de 44.5, 89, 133.5 y 178 N, las velocidades de deslizamiento de 0.1, 0.2, 0.4 y 0.6 m/s y la distancia deslizada fija de 55.977 m. Se determinó que la tasa de desgaste en los bloques aumento por efecto del aumento de la carga de forma lineal en algunos de los ensayos y que disminuyo por efecto del aumento de la velocidad en forma exponencial en todos los ensayos. Se encontró que para los anillos la tasa de desgaste disminuyó con un fuerte efecto al aumentar la velocidad de deslizamiento, a partir de cargas normales aplicadas superiores a 89 N y velocidades superiores a 0.2 m/s y que aumento al aumentar la carga normal aplicada, para todas las categorías de velocidad de deslizamiento constante. El aumento tanto de la carga, como el aumento de la velocidad, tuvo como efecto el aumento de la temperatura. Se encontró que el coeficiente de fricción disminuye con el aumento de la velocidad de deslizamiento, para todas las categorías de carga normal aplicada. La disminución en los valores en el coeficiente de fricción promedio va desde 0.8235 para una carga aplicada de 89 N y velocidad de deslizamiento igual a 0.1 m/s, hasta 0.5182 para una carga aplicada de 89 N y velocidad de deslizamiento igual a 0.6 m/s. El coeficiente de fricción se mantuvo estable, es decir, invariable para cada una de las categorías de velocidad constante al aumentar la carga, con excepción de la categoría de 0.6 m/s de velocidad, en el rango de carga aplicada que va desde los valores de 44.5 N a 89 N en donde se aprecia una disminución promedio más pronunciada. La técnica de microscopía electrónica se utilizó para determinar los mecanismos de desgaste, permitiendo encontrar la presencia de un acentuado proceso de adhesión en los anillos para baja velocidad y un proceso mixto de adhesión y delaminación a alta velocidad, ya que se detecta la presencia de “capas” de material. Se encontró pequeñas zonas indicativas de un desgaste adhesivo ligero en los bloques y zonas claramente definidas con la presencia de adhesión a medida que aumenta la carga aplicada. Además se detectó en los bloques la presencia de capas de material que son más pronunciadas según la mayor o menor carga aplicada, lo que denota a su vez la existencia de un mecanismo de delaminación y la presencia de algunas zonas donde se observan grietas, las cuales indican la existencia de un mecanismo de desgaste por deterioro cíclico o fatiga. Los valores de las tasas de desgaste encontradas en el presente trabajo corresponden a un régimen de desgaste severo (mayores que  $2.36E-02 \text{ mm}^3/\text{m}$ ) por lo que no se encontraron transiciones en el régimen de desgaste.

**CAPITULO I**  
**INTRODUCCIÓN**

## 1.1. Introducción

En los tiempos actuales el desgaste como problema mecánico, en particular, el producido por el deslizamiento asociado al movimiento que se presenta en la mayoría de las máquinas, es de vital importancia para los ingenieros mecánicos y para la industria, en función de los grandes inconvenientes tanto técnicos como económicos que este fenómeno ocasiona, al ser una de las principales causas del reemplazo de componentes. Esta situación ha llevado a plantear este tema a fin de que se analice en detalle bajo condiciones específicas controladas y de esta forma, con la información producida, dar una referencia desde el punto de vista de la ingeniería mecánica en el diseño y mantenimiento, así como para la correcta selección, uso y reemplazo de los materiales estudiados y, también para la ingeniería de materiales como apoyo en el análisis de fallas.

En este trabajo se escoge como material de ensayo el acero AISI 4340 de amplia utilización tanto en el ámbito nacional como internacional, muy tenaz y de elevada resistencia a la tracción y la torsión, con aplicaciones tales como ejes de transmisión para todo tipo de motores, ejes de tractores y maquinarias, engranajes y piñones, piezas de maquinarias sujetas a grandes esfuerzos, husillos, vástagos y palancas, partes para máquinas, rotores de turbinas, cigüeñales, puntas de eje, ruedas dentadas, pernos, levas, cardanes, crucetas, acoples, tornillos, sujetadores, portaherramientas, árboles de engranaje, etc.

La utilidad reviste en las implementaciones que se hacen para el mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, en la industria nacional. Para ello se hace necesario el análisis de los fenómenos y parámetros que influyen y modifican el tiempo de vida útil de partes y componentes de las máquinas entre ellos el desgaste, el cual se manifiesta siempre que exista movimiento y/o carga.

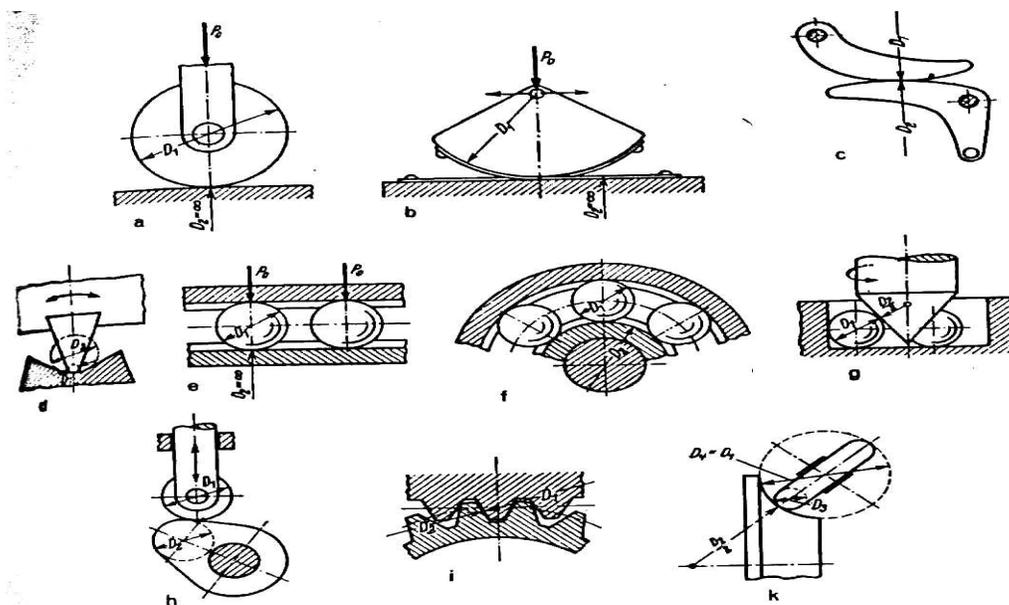
El problema principal en el estudio de dicho fenómeno es que no existe una regla general que nos explique el comportamiento del mismo. Por otra parte conociendo la resistencia al desgaste de los materiales se puede estimar su vida útil así como frecuencia de mantenimiento y/o reposición, para maximizar la relación entre producción y productividad.

La orientación de las investigaciones sobre el tema, se enfocan por una parte, a aquellas que tratan de obtener una comprensión general del problema, con el propósito de obtener modelos

matemáticos que permitan postular leyes para el desgaste. Luego están las que se dedican a estudiar un aspecto en particular como el efecto de alguna variable, y por último las que intentan producir información más directa, de aplicación útil para los diseñadores de máquinas e ingenieros de mantenimiento. Se considera que esta investigación se encuentra ubicada bajo el enfoque relacionado con el efecto de alguna variable en particular.

En décadas recientes, para mejorar los rendimientos mecánicos y minimizar los costos, surgió la tribología como ciencia que agrupa a todo el campo de las interacciones que ocurren en el contacto de sólidos en movimiento relativo. Con la tribología se ha tratado de crear en forma sistemática un conjunto de conocimientos ordenados y coherentes.

Un tribosistema está definido por superficies en contacto mecánico bajo movimiento relativo. (Fig. 1.1). Una tribosuperficie está sujeta a contacto deslizante o rodamiento, o de impacto (carga transitoria).



**Fig. 1.1: Sistemas de rodadura más importantes**

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| a) Rueda de traslación | f) Cojinete de anillos |
| b) Sector oscilante    | g) Pivote              |
| c) Palanca de rodadura | h) Leva y botador      |
| d) Cuchilla en apoyo   | i) Ruedas dentadas     |
| e) Patín de rodadura   | k) Ruedas de fricción  |

El desgaste puede ser ahora definido como la pérdida del material de la tribosuperficie. El tribosistema general esta afectado por una multitud de parámetros, la mayoría de los cuales son difíciles de controlar, medir o igualmente identificar.

En la práctica esos parámetros se dividen en tres grupos, diseño, material y medio ambiente, como se puede observar en la Tabla 1.1.

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>DISEÑO</b>         | Condición de la tribosuperficie, tal como rugosidad y microdureza   |
|                       | Area de contacto nominal entre los cuerpos  |
|                       | Forma del contacto mecánico, por ejemplo, Contacto puntual entre una bola y un plano, contacto lineal entre un rodillo y un plano |
|                       | Niveles de las fuerzas aplicadas  |
|                       | Niveles de la velocidad relativa de las superficies de contacto   |
| <b>MATERIALES</b>     | Propiedades del material, mecánicas, físicas, químicas, etc.  |
|                       | Estado de fase: gas, líquido, sólido  |
|                       | Combinaciones del material, por ejemplo, la solubilidad entre dos metales   |
|                       | Alteraciones inducidas a la fricción y el desgaste, cortes, fisuras, etc.   |
| <b>MEDIO AMBIENTE</b> | Propiedades químicas: potencial químico, agresividad, corrosión, etc.   |
|                       | Propiedades físicas: cambios de temperatura, presión, humedad, atmósfera, etc.  |
|                       | Propiedades mecánicas: coeficiente de fricción, viscosidad, etc.  |

**Tabla 1.1: Clasificación de los parámetros que afectan a un tribosistema**

Debido a esta gran variedad y cantidad de factores, aun cuando se ha generado gran cantidad de trabajos de investigación experimental hasta el presente, todavía, no sé está cerca de hacer una generalización que permita anticipar con cierto grado de exactitud, el comportamiento de un determinado sistema tribológico en un caso real. La principal razón que dificulta la comprensión del desgaste deslizante, es que las superficies se cubren unas a otras y lo que se estudia son los efectos producidos por las interacciones y no el proceso en el instante en que ocurre. En este sentido, se han logrado avances en el examen dinámico de huellas de desgaste, realizándolos en el interior de un microscopio electrónico (Ruff, A.W et al 1981), por lo que, hasta el presente, basándose en la observación de los efectos resultantes, se obtienen resultados hasta ahora satisfactorios.

La situación de Venezuela, hoy más que nunca, conlleva a que se le dé una importancia creciente a la Ingeniería de Mantenimiento debido a la gran incidencia negativa que tienen los fenómenos de desgaste en la industria, no obstante, aún cuando no se puede desestimar que

algunos sectores de la economía de un país dependen de la reposición de componentes desgastados y actualmente, sería más adecuado dirigir los esfuerzos hacia la prolongación de la vida útil de los elementos de máquinas, antes que a la fabricación en gran escala de piezas de reposición, todo esto básicamente por la situación económica coyuntural y estructural que vive el país.

Entre las consecuencias que origina el fenómeno de desgaste como falla inevitable donde quiera que haya cuerpos en contacto bajo carga, con movimiento relativo, está la reducción de la eficiencia de operación, pérdidas de potencia por fricción, incremento del consumo de lubricantes y eventualmente conduce al reemplazo de componentes desgastados y hace obsoleto el uso de las máquinas en su conjunto. La gran influencia negativa que tiene en la economía la reposición de piezas desgastadas y la obsolescencia de las máquinas en su conjunto ha sido ampliamente reconocida. Aún cuando históricamente, las consecuencias del desgaste son más conocidas que las de fatiga, las investigaciones en desgaste datan de finales de la década de 1930.

Antiguamente el diseño de máquinas se enfocaba principalmente al aspecto cinemático de los sistemas mecánicos. Debido a los avances tecnológicos, con la aparición de máquinas de potencia y velocidades cada vez mayores, surgió la necesidad y por ende la importancia de los cálculos de la resistencia al desgaste.

Desde el punto de vista de la investigación científica y tecnológica se ha producido un creciente interés sobre el tema, en el que muchas investigaciones han estado dedicadas a los aspectos básicos del fenómeno de desgaste, no siendo sus resultados de aplicación inmediata a la industria. En otros casos se dedican a aspectos de más rápida aplicación, como el efecto de diferentes variables y la evaluación de diversos materiales. El resultado de estas investigaciones es publicado en revistas especializadas, pero siendo de difícil acceso y/o lectura para ingenieros de producción, diseño y mantenimiento. Por otra parte a los ingenieros de producción y mantenimiento se les presenta la inquietud por obtener un aumento de la vida útil, esto conlleva diversas opciones, por supuesto todas ellas enmarcadas en el campo de estudio del desgaste en general, ya sean, conociendo las condiciones óptimas de funcionamiento de un material en particular o buscando materiales alternos para sustituir a los que se desgastan muy rápidamente.

Otro problema que confronta el personal de ingeniería, es el hecho de que el comportamiento frente al desgaste que afecta a las máquinas no constituye una propiedad característica de los materiales, sino que depende del sistema, constituido generalmente entre dos cuerpos, en la que pequeñas variaciones de velocidad, carga o condiciones ambientales, pueden causar grandes cambios en la tasa de desgaste de cualquiera de las dos superficies en contacto, sin contar que también se conoce de la existencia de diversos tipos de desgaste por deslizamiento. Entre estos, se puede hablar de un desgaste oxidativo, desgaste adhesivo, por delaminación y otras teorías que se mencionan en este trabajo y que procuran explicar el desgaste y dar una ley o principio sobre el cual poder prevenirlo.

Además es importante, la conveniencia de establecer un entendimiento efectivo entre los trabajos realizados por los investigadores, por una parte y los ingenieros de producción, diseño y mantenimiento por la otra, en virtud, de que estos últimos son los principales beneficiados de los trabajos realizados por los primeros.

Todos estos aspectos mencionados, hacen que el fenómeno de desgaste, analizado a través de los ensayos que se realizan de los diferentes materiales, sea muy importante y propicio no solo para futuros trabajos de investigación, sino también para el desarrollo industrial en general.

En la Escuela de Ingeniería Mecánica se han realizado desde 1981 diversos trabajos de investigación en los que se han estudiado las características friccionales de aceros como AISI 1045, AISI 1060, AISI 4140 y AISI 4340 en condiciones de deslizamiento sin lubricación, mediante ensayos de desgaste y a diferentes condiciones de dureza y carga normal. Numerosos trabajos se han publicado en la literatura internacional en los que se han comprobado las variables de desgaste en concordancia a los ensayos realizados. El objetivo principal de los trabajos realizados anteriormente, ha sido producir información de aplicación, más directa para los diseñadores de máquinas e Ingenieros de Mantenimiento.

En principio, para el estudio de los efectos producidos por las variables a ser consideradas en la presente tesis; a saber: la carga, y velocidad de deslizamiento se pueden especificar las siguientes referencias.

La teoría de Archard, J.F. (1953) predice que el desgaste aumenta en proporción directa al aumento de la carga. Posteriormente Welsh, N.C. (1965), encontró, que generalmente existe una dependencia lineal entre la tasa de desgaste y la carga, siempre que no haya cambios de régimen de desgaste. Welsh, N.C. (1965), cita una investigación publicada por Kehl y Siebel en 1939, donde se reporta una transición de desgaste severo a suave con el aumento de la velocidad.

Lipson, Ch. (1967), por su parte, reseña que el desgaste aumenta casi proporcionalmente con la carga aunque esta relación es afectada por el calor friccional producido en la intercara de contacto. Con respecto a la distancia deslizada, Lipson, Ch. (1967) reseña trabajos donde se ha reportado una relación lineal entre el desgaste y el logaritmo de la distancia para los periodos iniciales, tendiendo luego a una relación exponencial a medida que avanza el proceso, sin embargo esta afirmación no es consistente con la evidencia experimental presentada.

Por otro lado el concepto de “desgaste cero” de Bayer R. G. y Wilson J. T. (1971), propone limitar el esfuerzo de corte máximo a 0.54 de la resistencia a la fluencia en corte, para que el desgaste quede restringido a la mitad de la altura de las asperezas de la superficie más rugosa.

La otra variable a ser analizada en este estudio es la velocidad de deslizamiento; cuando el movimiento es rotacional, los cambios de diámetro generan variaciones en la velocidad de deslizamiento, por tanto, la velocidad puede ser variada dentro de ciertos límites, no obstante hay que considerar que los cambios de diámetro conllevan variaciones del área y la presión aparente de contacto.

Según Kragelskii I. V. y Alisin V.V. (1981), el efecto de la velocidad está relacionado con la tenacidad de los materiales sometidos a desgaste, ya que esa variable determina el tiempo de existencia de un enlace friccional y en consecuencia, la tasa de deformación del material.

Según Irureta R.; Natera M. y Zuccarinni G. (1981), que fue el primer trabajo realizado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la U.C.V., en el cual se trabajó en desgaste del tipo deslizante sin lubricación, entre un bloque de material acero AISI 1045, AISI 1060, a los cuales se les hizo un normalizado para obtener mayor dureza y AISI 4140 y AISI 4340 bonificados, y un anillo de material acero AISI D2 sometido a templado y revenido, en condiciones de variación de la carga, control de humedad del aire y velocidad constante, concluyeron que durante los primeros ciclos

del ensayo se observa un bajo volumen desgastado, en los siguientes ciclos aumenta pero siempre mantiene una baja tasa de desgaste para todos los aceros estudiados. En particular el AISI 4140, después el AISI 1060 es el que presenta menor tasa de desgaste, ocurriendo la tasa de desgaste de transición para un valor alto de carga de 102 N, lo cual indica una marcada resistencia al desgaste. Para la segunda transición se tiene una carga de 116 N. Para el acero AISI 4340 la primera transición ocurre para un valor de carga menor(67 N) que en el acero AISI 4140, con tasa de desgaste mayores que éste.

Vazquez, J.C. (1986), estudió algunos aceros basándose en los efectos de la dureza y la carga normal aplicada, bajo condiciones de fricción deslizante, entre ellos el acero AISI 4340 para el cual recomienda una dureza de 38 Rockwell C. Igualmente detectó transiciones de la tasa de desgaste con respecto a la carga. Las magnitudes de estas transiciones son relativamente pequeñas, de 1.5 a 4, es decir, que la tasa de desgaste en el instante de la transición no varía más de esas magnitudes en su valor, por lo general, pero su correlación para diferentes geometría de los cuerpos es difícil, por lo que concluyó que no se puede garantizar en la práctica industrial, que para determinadas condiciones escogidas *a priori*, se presentarán los regímenes de desgaste suave. Por otro lado, sugiere la existencia de dos transiciones de la tasa de desgaste con la carga, la primera de ellas sería producto del comienzo de la fatiga de las asperezas y la segunda, debida al cambio de naturaleza de los contactos; al pasar de ser principalmente elásticos a ser mayoritariamente plásticos.

Guerrero R. y Rojas M. (1984), concluyeron que, al hacer una comparación de cada uno de los valores de la tasa de desgaste obtenidos para cada una de las cuatro durezas estudiadas, es decir, 38; 43; 49 y 53 (nominal) Rockwell c, notaron que a medida que aumenta la dureza, la tasa de desgaste disminuye lo que implica un incremento de la resistencia al desgaste en el acero AISI 4340. Finalmente para un valor de carga de 150 N y una dureza de 43 Rockwell c el comportamiento para la curva de tasa de desgaste contra dureza fue muy irregular ya que, para ese valor de dureza la tasa de desgaste es muy elevada respecto a las otras durezas; concluyendo que sea probablemente debido a una fuerza de roce alta lo cual conlleva a que se generen altas temperaturas, sufriendo el material un ablandamiento y por consiguiente un incremento en la tasa de desgaste.

Según Wang, Y. et al (1999), los autores sugieren que la tasa específica de desgaste que va de  $1\text{E-}08$  hasta  $2\text{E-}08 \text{ mm}^3 /(\text{N} * \text{mm})$  puede ser considerado la línea que divide entre el desgaste suave y el desgaste severo. Si la tasa de desgaste se encuentra entre esos dos valores se puede usar el término desgaste de transición. El acero AISI 52100 y el 1080 por ejemplo, muestran el mecanismo de transición desde el desgaste suave, caracterizado por adhesión y delaminación, con el incremento de la carga normal y/o la velocidad de deslizamiento en seco. Por otra parte, la variación en la microestructura tiene muy poco efecto sobre el mecanismo de transición de los aceros, no obstante, a través de diferentes microestructuras hay distintas cargas críticas o velocidades para las tasas de desgaste de transición.

Cadenas, P. (2000), mediante ensayos esfera sobre disco (“Pin on Disc”) variando la carga, la velocidad y la distancia, sin lubricación utilizando como par tribológico acero AISI 4340 para el disco y acero AISI 52100 para la esfera, concluye que el acero AISI 4340 presenta un buen comportamiento al desgaste por deslizamiento, ya que se mantuvo dentro de un régimen de desgaste suave, para condiciones que se consideran severas. Entre estas condiciones tomó como rangos de carga aplicada entre 2 N y 10 N; velocidad de deslizamiento entre 0.1 m/s y 0.2 m/s y distancia desde 250 m hasta 1000 m, obteniendo como resultados más significativos que la tasa de desgaste del acero AISI 52100 aumenta directamente con la carga normal desde  $2\text{E-}05$  para 2 N hasta  $9\text{E-}05$  para 10 N. El volumen desgastado de los discos aumenta con la carga normal, la distancia deslizada y velocidad de deslizamiento según el análisis comparativo entre los anchos y profundidades de las huellas de desgaste realizado mediante profilometro. De los mecanismos de desgaste observados, en este trabajo, se obtuvo uno de tipo mixto, es decir, adhesivo-abrasivo en el acero AISI 52100, el cual predominó para los niveles inferiores de carga normal y distancia deslizada. Por otro lado determinó un mecanismo de desgaste mayoritariamente abrasivo en el acero AISI 52100, para niveles de carga y distancia deslizada mayores a 5 N y 500 m respectivamente. Adicionalmente para el acero AISI 4340 determinó un mecanismo de desgaste mixto, es decir, adhesivo, oxidativo, abrasivo y de deterioro cíclico. Mediante la ecuación de Archard, J.F. (1953) se hizo una comprobación gráfica de la proporcionalidad directa entre el volumen desgastado de las bolas con la distancia deslizada y la carga normal aplicada para los niveles de las variables operacionales utilizadas en este trabajo y del cual se obtuvo el valor del coeficiente de desgaste  $k$ , resultando un valor de  $8\text{E-}04$ , concluyéndose con esto que el régimen

de desgaste fué suave para todos los ensayos. En cuanto al comportamiento en el valor del coeficiente de fricción, este aumentó con la carga normal y con la velocidad de deslizamiento durante el periodo de rodaje (“running in”). El aumento en el coeficiente de fricción máximo fue de 0.564 hasta 0.648 para 2 N y 10 N de carga aplicada respectivamente. En cuanto al efecto de la velocidad sobre el coeficiente de fricción máximo se obtuvo que fue de 0.53 hasta 0.62 para una velocidad de 0.1 m/s y de 0.2 m/s respectivamente. En cuanto al efecto de la distancia deslizada sobre el coeficiente de fricción para valores mayores a 900 m, su valor se hace independiente de la carga normal y de la velocidad de deslizamiento, tendiendo a un valor promedio de 0.52.

El acentuado incremento del coeficiente de fricción observado al inicio de los ensayos se justifica en este trabajo, debido a la formación de uniones adhesivas como consecuencia de la alta presión de contacto sin lubricación. Adicionalmente justifica el descenso brusco del coeficiente de fricción observado durante el periodo de rodaje por la formación de óxidos de hierro debido a que los ensayos se realizaron en aire

Estas referencias permiten establecer un criterio base a la hora de hacer comparaciones y emitir conclusiones en el presente trabajo.

## **1.2. Planteamiento del problema**

El trabajo consiste en el estudio experimental mediante ensayo al desgaste del acero AISI 4340, con geometría tipo bloque sobre anillo deslizante, normalizado según Norma ASTM D2714-88, al seco y sin ningún tratamiento térmico con la máquina de ensayo de fricción tipo Falex N° 1.

En dicho ensayo se hace girar un anillo contra un bloque estacionario, el cual, durante todo el ensayo esta sometido a carga constante, tomándose mediciones de fuerza de roce y temperatura. Para ello se hace necesario el mecanizado tanto de los bloques como de los anillos. El material del bloque es AISI 4340 y el anillo es de material acero AISI D-2. Las condiciones para la determinación de la tasa de desgaste del bloque se establecen con base en cuatro valores tanto para la velocidad, como para la carga aplicada, de acuerdo a los ensayos realizados previamente.

El cálculo del valor de la tasa de desgaste, se hace por diferencia de masa, antes y después del ensayo al par tribológico.

Adicionalmente se determina de manera experimental el coeficiente de fricción, para cada una de las combinaciones en el rango de valores de velocidades y cargas aplicadas. A continuación se hace un estudio estadístico mediante las gráficas del coeficiente de fricción, tasa de desgaste, volumen de desgaste, en función de la velocidad y carga aplicada, temperatura y coeficiente de fricción en función de la distancia deslizada, de acuerdo a la información recabada según la metodología experimental.

Finalmente se analizan las huellas de desgaste producidas en muestras tanto de los bloques como de los anillos respectivos, empleando la técnica mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), con el fin de determinar el mecanismo de desgaste y así en resumen, contrastar los resultados obtenidos con los resultados de trabajos anteriormente realizados y obtener las respectivas conclusiones y recomendaciones.

### **1.3. Objetivos del trabajo**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Evaluación del desgaste del acero AISI 4340 bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación utilizando como material el acero AISI D-2 con variación de la carga, y la velocidad de deslizamiento.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Mecanizar los bloques y anillos a ser utilizados en los ensayos.
- Calibrar la maquina de ensayo de fricción Falex N°1.
- Medir mediante microdurómetro la dureza del material.
- Ejecutar los ensayos de desgaste mediante la maquina de ensayo de fricción Falex N°1.
- Determinar experimentalmente, mediante balanza digital, las masas de las probetas antes y después del ensayo.
- Calcular la tasa de desgaste.

- Observar y analizar la huella de desgaste mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB).
- Determinar el coeficiente de fricción para cada variable (velocidades y cargas)
- Graficar el coeficiente de fricción, la tasa de desgaste, volumen de desgaste y temperatura en función de la velocidad, la distancia deslizada y la carga normal aplicada.
- Analizar los datos obtenidos de tablas, gráficos, fotomicroscopía, cálculos, programas, etc.
- Comparar los resultados obtenidos respecto a los de trabajos anteriores.
- Emitir conclusiones y recomendaciones.

#### **1.4. Justificación de la investigación**

El desgaste producido por deslizamiento (rayado de tipo adhesivo) es de mucho interés para el ingeniero mecánico, pues se presenta en la mayoría de las máquinas y es una de las principales causas de reemplazo de componentes. Aunque lo más común es que las interacciones ocurran en presencia de lubricantes, estos generalmente no evitan por completo el contacto (principalmente en periodos de arranque y parada) y a menudo el suministro de ellos falla. En estos casos se producen interacciones en seco, las cuales son similares en sus consecuencias a las estudiadas en ensayos de laboratorio, donde la ausencia de lubricante es cuidadosamente controlada con el propósito de acelerar el ensayo (Rigney, D.A.1981).

El estudio sistemático de la influencia de las variables operacionales sobre la resistencia al desgaste de los materiales involucrados implica realizar un diseño adecuado del sistema con respecto a su selección, contribuyendo así al aumento de la vida útil de los componentes ( Peterson, M.B. 1976).

El desgaste ha sido un objetivo de interés práctico por los últimos mil años, sin embargo, no ha recibido gran aceptación por parte de los científicos. El pensamiento que prevalece es que, más fácil es reemplazar las partes cuando alcanzan el desgaste que proveer una vida adecuada en el diseño. Esto ha sido cierto durante un tiempo, sin embargo, en los tiempos actuales con el clima económico presente, es una práctica muy costosa, por las siguientes razones:

1. El mantenimiento es costoso. No se ajusta el costo de las partes y su reemplazo con el mantenimiento adecuado que debe aplicarse en todas las veces que se espere dicha acción.

2. Las partes y materiales son de suministro a corto plazo, por consiguiente, los equipos están fuera de servicio por más tiempo y, a mayor cantidad de inventarios se les deben aplicar acciones de mantenimiento.
3. Las partes desgastadas causan problemas secundarios tales como incremento de vibraciones (conduce a la fatiga), carga de choque y desgaste acelerado.
4. El desgaste reduce el tiempo para el reemplazo de las partes causando una pérdida de productividad y baja la efectividad del personal.

Recientemente, debido a una más efectiva contabilidad del costo, la industria ha comenzado a darse cuenta que el control del desgaste es importante y que nueva información esta siendo solicitada para permitir diseños adecuados.

En cuanto a la selección como material de estudio se toma el acero AISI 4340 para el presente trabajo, éste es un acero de amplio uso, en la construcción de arboles de transmisión, engranajes, tornillos de movimiento, levas, bielas, ejes de bombas y compresores, matrices, válvulas, estoperas, rotores de turbinas, cigüeñales, puntas de ejes, cardanes, crucetas, acoples, husillos, palancas y piezas varias. Todos estos componentes están sometidos a desgaste por deslizamiento, por lo que son reemplazados, ya que contribuyen a la disminución de la eficiencia mecánica y al mismo tiempo al aumento en el consumo de lubricantes. Sin embargo, el desgaste de estas piezas es inevitable debido a que este fenómeno se presentará siempre que exista el contacto de dos cuerpos bajo carga y/o movimiento.

Por todo lo expresado anteriormente, el presente estudio consiste en evaluar el efecto de las variables operacionales sobre el par tribológico escogido, es decir, carga normal aplicada y velocidad en condiciones de deslizamiento sin lubricación, con la finalidad de que a partir de los resultados obtenidos, contribuyan en ampliar el conocimiento que se tiene sobre el desgaste por deslizamiento de los aceros frecuentemente utilizados para aplicaciones en la construcción de elementos de máquinas, mediante la identificación de los regímenes de desgaste suave y severo, así como las transiciones en dichos regímenes.

**CAPITULO II**  
**FUNDAMENTO TEÓRICO**

## 2.1. Definición del desgaste

El desgaste es el daño progresivo que envuelve pérdida de material, el cual ocurre sobre la superficie de un componente (mecánico) como resultado del movimiento relativo, para partes que trabajan con contacto entre sí. Para ser más precisos, se considera al desgaste como el desprendimiento de partículas de la superficie de un cuerpo y/ó el desplazamiento del material de zonas en contacto, hacia zonas libres de carga.

Czichos, H (1978), realiza un enfoque de sistemas, en el cual considera los factores que influyen en el desgaste, clasificados de la siguiente manera:

a) Variables operacionales.

Carga aplicada.

Velocidad.

Temperatura y

Tipo de movimiento.

b) Variables estructurales del sistema tribológico.

b1) Propiedades volumétricas de los dos cuerpos en contacto.

Geometría.

Dimensiones.

Composición química.

Microestructura.

Dureza, etc.

b2) Propiedades superficiales de los dos cuerpos en contacto.

Rugosidad.

Microdureza, etc.

b3) Area de contacto entre los dos cuerpos.

b4) Propiedades de los lubricantes interpuestos.

b5) Características de la atmósfera.

b6) Interacciones entre los cuatro posibles triboelementos.

La tasa de desgaste TD es generalmente definido como la pérdida del volumen de la superficie desgastada por unidad de distancia deslizada y viene en unidades de  $\text{mm}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ . Se define adicionalmente la tasa de desgaste específica TDE como la pérdida del volumen de la superficie desgastada por unidad de distancia deslizada por unidad de carga normal aplicada y se expresa en unidades de  $\text{mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$ . Para la situación particular de deslizamiento en seco o sin lubricación la tasa de desgaste depende de la carga normal, la velocidad de deslizamiento relativa, la temperatura inicial y las propiedades térmicas, mecánicas y químicas de los materiales en contacto. Hay muchos mecanismos físicos que contribuyen al desgaste y no hay seguridad de un modelo simple y universal que sea aplicable para todas las situaciones.

Cuando se estudian las propiedades al desgaste de una clase especial de materiales tales como polímeros o metales, en el presente caso acero, es esencial llevar en mente la complejidad de un sistema tribológico general. Un resultado que carezca de lazos- o nivel de conocimiento- implica en tribología que algún establecimiento puede ser verificado o descartado con la ayuda de los experimentos, solo sí es hecha una selección de los parámetros y variables. Esto conlleva a comparaciones entre diferentes materiales en situaciones tribológicas similares o diferentes, eventualmente enfocadas en la categoría con respecto a la resistencia al desgaste, o en al menos distinguir diferentes comportamientos al desgaste.

## **2.2. La adhesión conceptos básicos (desgaste deslizando)**

El desgaste adhesivo, también llamado desgaste por fricción ó desgaste deslizando, es una forma de deterioro que se presenta entre dos superficies en contacto deslizando.

Toma lugar típicamente en cojinetes de deslizamiento, chumaceras, bocinas, bujes motores de combustión interna, compresores recíprocos, bielas, tornillos de potencia, matrices, estoperas, engranajes, guías en general, etc.

Según la teoría adhesiva del desgaste deslizando, bajo la acción de las cargas normales aplicadas los topes de las asperezas de las dos superficies sufren fluencia plástica y soldadura en frío. Al producirse el movimiento, las uniones soldadas se rompen por cizalladura, tomando lugar la separación en el cuerpo de menor dureza. De esta manera, la superficie más dura se cubre de una película transferida del material de la contracara, a la vez que se desprenden partículas en el

proceso. Se cree que otros mecanismos, como abrasión y fatiga superficial son responsables por el desprendimiento de partículas de la película transferida. Sin embargo, existen otras teorías que tratan de explicar de maneras diferentes esta forma de desgaste y la formación y remoción de las partículas.

Los términos de adhesión y cohesión se refieren a la habilidad de las estructuras atómicas de adherirse entre ellas y formar lazos superficiales, los cuales están íntimamente en contacto. La teoría de la adhesión (Bowden, F. y Tabor, D. 1950; 1964 y 1973) ha sido ampliamente aceptada como una base para entender el fenómeno de desgaste deslizante. En esencia, dice que el área real de contacto entre dos cuerpos es muy pequeña, y está formada por los puntos de las asperezas más altas que se encuentran en contacto. Es decir, las superficies, aún teniendo el mejor acabado superficial posible y siendo a escala macroscópica en apariencia lisas, en realidad presentan una micro-topografía irregular de asperezas en forma de crestas y valles (Tabor, D.1973). Debido a esto, cuando las dos superficies hacen contacto mutuamente, bajo la acción de una carga, el contacto solo se produce en las crestas de las asperezas y como consecuencia, el área real que soporta la carga es mucho más pequeña que el área aparente de contacto. Consecuentemente, el área real de contacto es independiente del área aparente de las superficies, pero es determinada por la carga aplicada (Archard, J.F. 1953). La presión en esos puntos de verdadero contacto es por lo tanto más alta que el valor correspondiente al valor nominal. Esto implica que los átomos más externos de una superficie se podrán acercar a aquellos de la contracara y eso es especialmente verdadero si las superficies son relativamente limpias y no contaminadas por extrañas capas superficiales. Sin embargo, en el caso que existan contaminantes superficiales tales como óxidos, la adhesión se vería disminuida, pero existiría de igual manera, a causa de las altas presiones que se generan debido al área tan pequeña que soporta la carga. Si deseamos separar suficiente superficie, la fuerza debe ser aplicada para sacar o deslizar esas partes. Esto se aplica según la naturaleza de los materiales aunque es particularmente significativo en el caso de metales dúctiles.

La adhesión juega un importante papel en las interacciones superficiales. La forma más simple en la teoría adhesional de fricción supone que aunque el contacto real es solo hecho en los

tipos de asperezas a nivel de relativas cargas bajas, las presiones de contacto verdadero son suficientemente altas para causar deformación plástica local.

La carga normal aplicada  $F_n$ , esta relacionada con el área real de contacto  $A_r$  por una propiedad del material la cual representa el punto de presión de la superficie más blanda, esto será numéricamente muy cercano en valor a la dureza de indentación  $H$ , es decir:  $F_n = A_r * H$

La fuerza de fricción total  $F_r$ , es el producto del área real de contacto  $A_r$  y el esfuerzo o tensión de corte específico  $K$ , que puede mostrar alguna unión.

Apartando los efectos de trabajo o esfuerzo por endurecimiento es imposible para una unión, exhibir un esfuerzo de corte más grande que el volumen del material más débil. Esto se puede expresar como:

$$F_r = A_r * K \quad \text{ec. 2.1}$$

Por lo que;

$$f = F_r / F_n = K / H \quad \text{ec. 2.2}$$

Esta ecuación esta de acuerdo con las leyes de fricción de Guillaume Admonton, ingeniero francés quien en el año 1699 fue el primero en establecer mediante apreciaciones cuantitativas dichas leyes. En la ecuación,  $f$  es una constante independiente de la carga y además del argumento físico que conlleva esto, provee una explicación de porque la fuerza friccional es independiente del área nominal, o área aparente de contacto entre los dos sólidos.

Admonton imaginó que la fricción era causada por la interacción de los picos de las superficies rugosas. En caso de materiales duros debían pasar unos sobre otros y en el de materiales más blandos era posible sortear el paso de los picos sorteando su geometría.

En adición a esto, el coeficiente de fricción se muestra asociado con la relación de dos propiedades al esfuerzo, del sólido más débil,  $K$  el esfuerzo o tensión de corte específico y  $H$  su dureza de indentación o de fluencia. Si bien los valores absolutos de esas cantidades pueden variar ampliamente de un material a otro, ya que posteriormente se consideró que la fricción se debía al corte de las uniones, por lo que la fuerza de fricción sería simplemente  $A_r$  veces el esfuerzo de

corte K. Mediante la ecuación 2.2 vemos que la ecuación 2.1 satisface las dos leyes de Admontons, ya que el área de contacto y la carga son eliminados.

Para muchos esa relación es más o menos constante y generalmente se puede esperar para un material tipo, universal, un valor en el coeficiente de fricción  $f$  entre 0.17 y 0.2 debido a que  $H$  vale aproximadamente  $3\sigma$  (esfuerzo de fluencia) y  $K$  aproximadamente  $0.5$  a  $0.6\sigma$ . Consecuentemente las gráficas adicionales explican, porque esto es, comparativamente, más limitado de extender en valores numéricos de  $f$  basados en la práctica entre superficies sólidas secas; ver Tabla 2.1

|                   | Espécimen de prueba          | $f$      |
|-------------------|------------------------------|----------|
| <i>Metales</i>    | Acero                        | 0.55-0.8 |
|                   | Aluminio                     | 0.5      |
|                   | Cobre                        | 0.8      |
|                   | Cadmio                       | 0.4      |
|                   | Cromo(superficie dura)       | 0.4      |
|                   | Acero endurecido             | 0.4      |
|                   | Bronce fosforoso             | 0.3      |
|                   | Fundición gris               | 0.4      |
| <i>No metales</i> | Material de fricción, frenos | 0.4-0.7  |
|                   | Materiales a base de carbono | 0.2      |

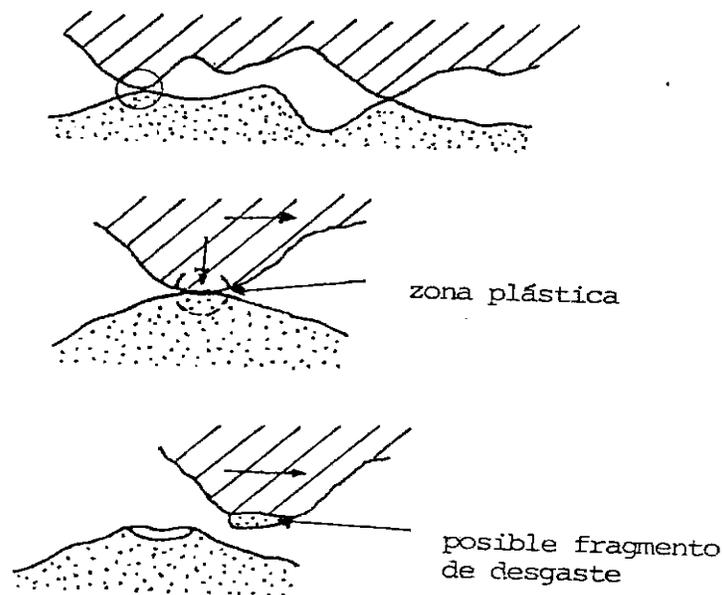
**Tabla 2.1 Coeficientes de fricción  $f$  típicos sin lubricación para materiales a baja velocidad en atmósfera normal desgastados contra aceros medios. Los valores de  $f$  dependen de las condiciones precisas de las pruebas y se toman ampliamente como representativos**

Según la ecuación 2.2  $f = Fr / Fn = K / H$ , el valor del coeficiente de fricción  $f$  solo depende de dos propiedades del sólido más débil y será básicamente independiente de la naturaleza de la dureza de la contracara. El rango de variación de valores de  $f$  en condiciones atmosféricas normales es pequeño, no sobrepasando el valor de 0.2 y la situación puede ser muy diferente sí la

superficie del metal esta limpia o que el deslizamiento tome sitio en un vacío, ya que no se produce la película protectora de óxido.

La teoría de la adhesión involucra la siguiente secuencia de eventos (Samuels, L.E.; Doyle, E.D.; y Turley, D.M. 1980):

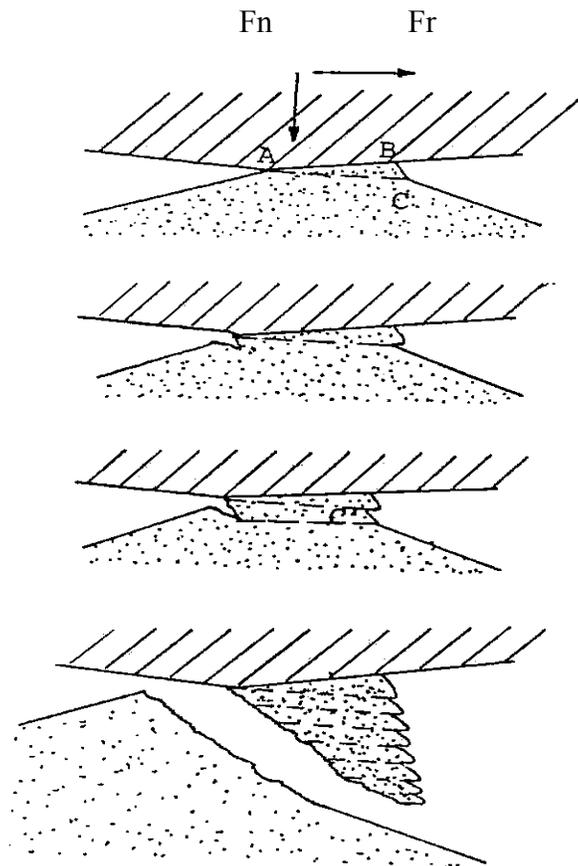
- a.- Aplastamiento de asperezas por deformación y desarrollo de una interfase entre las dos superficies. Esta interfase se halla sometida a un gran esfuerzo de corte.
- b.- Fractura de uno de los materiales en una posición cercana a la interfase, removiendo un fragmento de uno de los materiales y transfiriéndolo al otro.
- c.- Desprendimiento del fragmento transferido. Estos pasos se encuentran ilustrados en la Figura 2.1.



**Fig. 2.1 Representación esquemática un mecanismo clásico de adhesión para la generación de una partícula irregular de desgaste**

Esta teoría requiere de un enlace adhesivo muy fuerte. El contacto entre sólidos en aire es realizado por dos superficies que poseen capas de óxidos en ambas superficies, como consecuencia una adhesión verdadera no se llega a realizar.

Kayaba citado por Samuels, L.E.; Doyle, E.D.; y Turley, D.M. (1980) , ha propuesto un mecanismo basado sobre observaciones del comportamiento de modelos de asperezas que envuelve el separamiento de una por la otra, como se muestra en la Figura 2.2

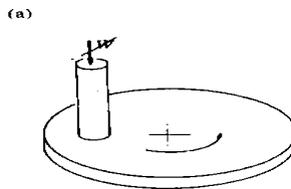


**Figura 2.2 Representación esquemática de un mecanismo para producir una partícula irregular de desgaste**

Sólo interacciones mecánicas necesitan ser asumidas en este modelo, pero este mecanismo no predice la forma primaria de las partículas provenientes del desgaste. Él sugiere que una zona plástica ABC se desarrolla primero por la interacción entre las dos asperezas, y que el desplazamiento por cizalladura ocurre a lo largo de AC, formando una lengüeta CC'. La zona plástica es así transferida a una capa más baja, y el proceso se repite generando un número de capas de lengüetas. Cuando la hendidura crece, ésta se corta, dando lugar a una partícula producto del desgaste.

### 2.3. Medición de la fricción

Lo básico en la medición de la interacción friccional es obtener una media resultante de la aplicación de una carga normal conocida entre dos superficies de prueba, sobre las cuales al mismo tiempo se obtiene una fuerza tangencial medible, para así incrementar esa fuerza hasta que sea detectable o que el movimiento relativo entre las dos superficies sea estable. Probablemente la forma más común de la medida friccional es usando un disco en los laboratorios de tribología; el cual puede hasta ser usado para medir el grado de relación del desgaste y la superficie dañada y se basa en la configuración cilindro o esfera sobre disco (Pin on Disc) Figura 2.3



**Fig. 2.3 Configuración Pin on disc**

La importancia de los efectos experimentales sobre la fricción han sido previamente anotados. Algunos pares de fricción son particularmente susceptibles a la presencia o ausencia de oxígeno, vapor de agua, u otros gases y vapores y tanto para investigaciones científicas. Por lo tanto las pruebas de fricción necesitan ser llevada a cabo en una cámara de comportamiento aislada, con atmósfera controlada.

### 2.4. Tribográficas

Los resultados de las pruebas tribológicas o tribopruebas conducen a datos sobre la fricción y el desgaste, generalmente presentados en la forma de gráficas, diagramas de transición o mapas. Las tribográficas son presentaciones gráficas de la fricción y la cantidad de desgaste en función de:

Parámetros operacionales, por ejemplo, carga normal aplicada ( $F_n$ ), velocidad  $V$ , temperatura ( $T$ ) o duración de la prueba ( $t$ ).

Parámetros estructurales, por ejemplo, el par tribológico, dureza, rugosidad, o microestructura de los materiales.

Parámetros de interacción, por ejemplo, esfuerzos de contacto, relación de espesor de película a rugosidad o forma de lubricación.

Los diagramas de transición caracterizan las condiciones críticas de los parámetros operacionales que separan los regímenes del comportamiento eficiente para un tribosistema determinado, del régimen de comportamiento ineficiente o en el que se produce una falla.

La tercera forma de presentación de los datos son los mapas, los cuales caracterizan a las condiciones operacionales, que separan diferentes regímenes de los mecanismos de desgaste o diferentes arreglos de los datos de desgaste.

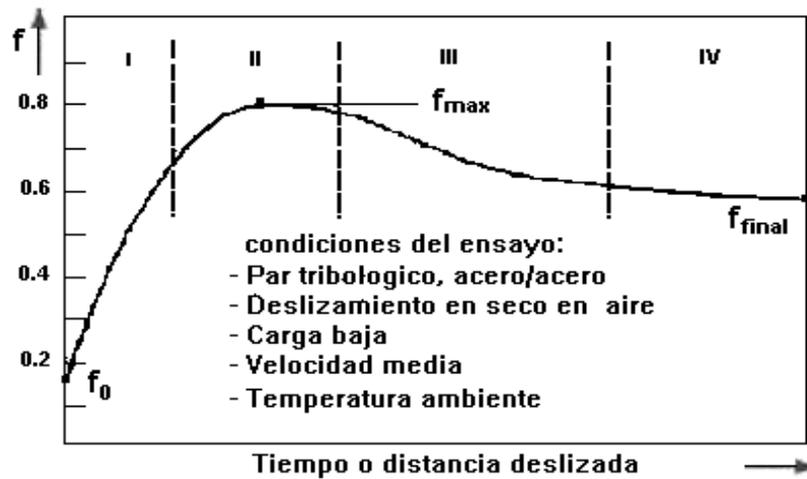
Se presentan los datos de fricción y desgaste en función de los parámetros estructurales y de operación. Se hace énfasis sobre la dependencia del tiempo, de los datos, parámetros operacionales, parámetros estructurales y parámetros de interacción.

El tipo más simple de todas las pruebas tribológicas envuelve la medida de la fricción o desgaste solo como función del tiempo.

#### **2.4.1. Curvas maestras fricción-tiempo**

La curva típica fricción-tiempo de deslizamiento en seco consiste de una presentación simplificada de cuatro estados del coeficiente de fricción Kennard, R.W. 1978 Un ejemplo típico para un sistema metal/metal se muestra en la Figura 2.4

El valor inicial del coeficiente de fricción del estado I, el cual es usualmente cercano a  $f_0 \cong 0.1$  es dependiente de cargas bajas  $F_n$  y de la resistencia al corte, no obstante es completamente independiente de las combinaciones de los materiales



**Fig. 2.4: Curva maestra coeficiente de fricción-tiempo**

La superficie con material removido y un incremento en la adhesión debido al incremento de áreas interfasiales limpias así como también el incremento de las interacciones de las asperezas y posibles partículas de desgaste atrapadas, permiten que se incremente el coeficiente de fricción.

En el estado II, se produce el máximo valor del coeficiente de fricción ( $f_{MAX} \cong 0.3$  a  $1.0$  mayormente entre metales). El cual se alcanza cuando ocurre la máxima adhesión interfasial, deformación de las asperezas y partículas de desgaste atrapadas.

En el estado III decrece el coeficiente de fricción debido posiblemente a la formación de una capa superficial triboquímica protectora y un decrecimiento en el proceso de surcos y asperezas deformadas.

El estado IV, esta caracterizado por condiciones tribológicas interfasiales en estado estable. El coeficiente de fricción, eventualmente permanece más o menos constante.

El comportamiento a la fricción debería estar caracterizado por los siguientes datos adicionales; Coeficiente de fricción inicial  $f_0$ , Coeficiente de fricción inicial máximo  $f_{MAX}$  y Coeficiente de fricción final de la prueba  $f_{Final}$ .

### 2.4.2. Curva maestra desgaste-tiempo

Consiste de tres estados de desgaste, como se muestra en la Figura 2.5

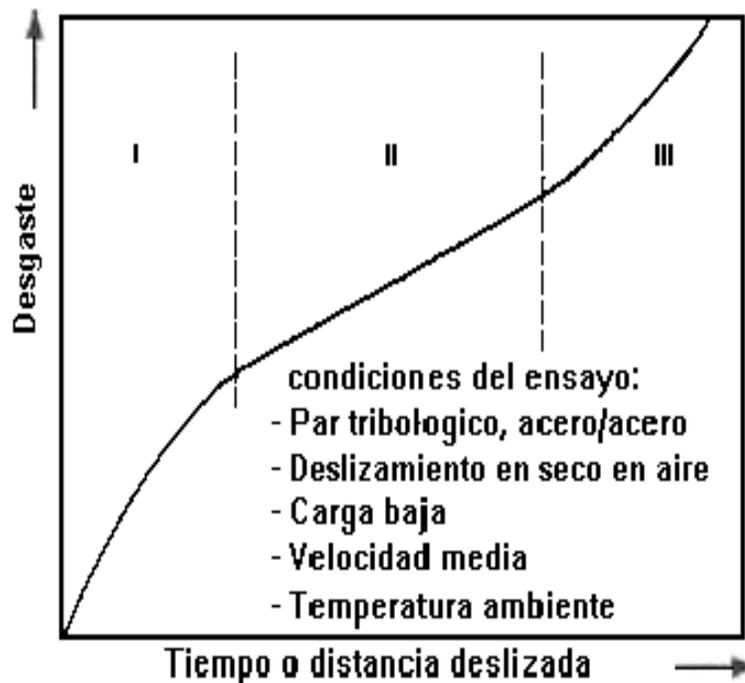


Fig. 2.5: Curva maestra desgaste-tiempo

#### *Estado I:*

Precede a un periodo de incubación de no desgaste llamado también periodo de rodamiento inicial, durante el estado I, la probabilidad de ocurrencia de los eventos de desgaste elementales decrecerá sí a través de los cambios en la topografía superficial, la tasa de interacción entre las asperezas con la superficie de desgaste decrece.

En el caso más simple de esa auto-acomodación del tribosistema, la cantidad de volumen de desgaste viene dado por una función raíz cuadrada del tiempo:

$$dW/dt \cong 1/W \Rightarrow W(t) = \text{Constante} * t^{1/2} \quad \text{ec. 2.3}$$

*En el estado II:*

El tribosistema exhibirá un relativo comportamiento lineal en función del tiempo, estable bajo la acción del proceso tribológico. Para aplicaciones de ingeniería el valor de la tasa específica de desgaste tolerable debería estar en el rango de  $T.D.E < 1E-06 \text{ mm}^3 / \text{N} * \text{m}$

$$dW / dt = \text{Const} \Rightarrow W ( t ) = \text{Const} * t \quad \text{ec. 2.4}$$

*En el estado III :*

Una aceleración del desgaste ocurrirá mediante una acumulación de procesos de desgaste elementales. Un gran incremento en un intervalo de tiempo causa también un gran incremento en el siguiente intervalo de tiempo.

$$dW / dt \cong W \Rightarrow W ( t ) \cong e^{\text{Const} * t} \quad \text{ec. 2.5}$$

En ese caso una auto-aceleración del proceso de desgaste ocurre, lo que conlleva a un daño catastrófico, falla y en consecuencia el sistema colapsa.

## 2.5. Mecanismos de desgaste

Se distinguen varios tipos de desgaste en los cuales , Eyre, T.S (1978) hace una discriminación según la importancia relativa que tienen en la industria, en los siguientes términos:

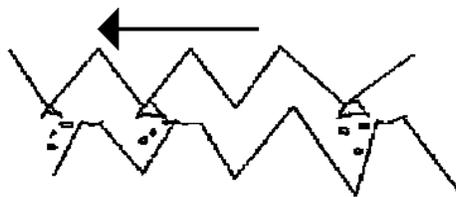
| TIPO DE DESGASTE           | IMPORTANCIA EN LA INDUSTRIA |
|----------------------------|-----------------------------|
| ABRASIÓN                   | 50%                         |
| ADHESIÓN                   | 15%                         |
| EROSIÓN                    | 8%                          |
| MICROOSCILATORIO(FRETTING) | 8%                          |
| QUÍMICO(CORROSIÓN)         | 5%                          |

**Tabla 2.2: Clasificación del desgaste de acuerdo a su importancia para la industria**

Adicionalmente, existen procesos en los cuales uno de estos tipos de desgaste se transforma en otro ó en los que dos ó más de ellos actúan habitualmente en forma combinadas en sistemas tribológicos, así como también diferentes tribomateriales y morfologías resultantes de la exposición de la superficie. Entre los tipos de mecanismos de desgaste básicos, se incluyen, el desgaste adhesivo, el desgaste abrasivo, el cual incluye el desgaste erosivo; el desgaste por fatiga y el desgaste por corrosión.

### 2.5.1. Desgaste adhesivo

Se produce adhesión entre las estructuras atómicas de dos cuerpos con movimiento relativo. Esto ocurre debido al contacto íntimo al que llegan las dos piezas por las altas presiones específicas en la zona de contacto real, dependiendo a su vez de la estructura de ambos materiales. En función a que dos superficies de un mismo material, con un alto grado de acabado superficial, es decir, con menores rugosidades, se adhieren perfectamente con solo ponerlas en contacto, por ser mayor las superficies adheridas, como consecuencia de la mayor fuerza por adhesión, el material con menor límite elástico, en el punto de contacto real, debe deformarse plásticamente por las altas cargas específicas a la que esta sometido, por lo que se crea un contacto íntimo entre los dos materiales.



**Fig. 2.6: Adhesión**

Debido a la influencia de la contaminación superficial producida por el medio ambiente, el endurecimiento de la superficie por efecto del trabajo mecánico y la creación de óxidos sobre la superficie, producen cambios de propiedades o formas de lubricación sólida que modifica todo el proceso, por lo que no se produce una adhesión como la descrita anteriormente.

### 2.5.2. Desgaste abrasivo

Es producido por partículas duras que penetran en una superficie; ocasionando deformación plástica con arranque de viruta. Se origina en el deslizamiento relativo, entre una superficie dura sobre otra blanda. Se presentan dos formas de desgaste de tipo abrasivo:



Fig. 2.7: Abrasión entre dos cuerpos

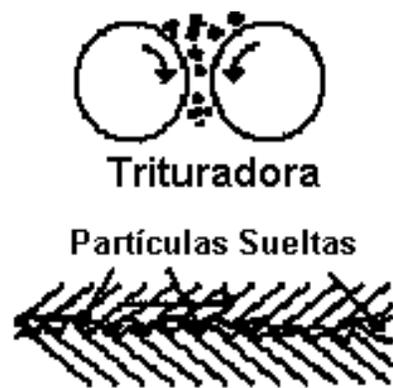


Fig. 2.8: Abrasión entre tres cuerpos

- Desgaste entre dos agentes, el más duro desprende material del más blando (Fig 2.7).
- Desgaste entre tres agentes, donde el tercer elemento son usualmente partículas duras, sueltas, que se ubican entre las dos superficies deslizantes, incrustándose en una y desprendiendo material en la otra (Fig 2.8).

El factor más importante a considerar para este mecanismo de desgaste, es la dureza de las superficies en contacto; también lo es el que se interponga una partícula de mayor dureza entre ellas. A su vez, en este tipo de desgaste no sólo hay material removido sino que hay una gran cantidad de material deformado plásticamente. Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones de una superficie o bien partículas sueltas. Este tipo de desgaste se presenta en equipos de perforación de suelos, trituradoras, molinos de bolas, en algunos casos en cuerpos en contacto deslizante, etc. En los metales la resistencia a la abrasión aumenta con la dureza; observándose que para los aceros este parámetro resulta ser menor que para metales puros de la misma dureza.

Es de advertir que esta propiedad en el material desgastado es más indicativa de la resistencia a la abrasión que la dureza original.

### 2.5.3. Desgaste por erosión

Se considera a la erosión como una forma de abrasión producida por esfuerzos de contacto relativamente bajos, debidos al impacto de partículas sobre una superficie.

Dichas partículas son impulsadas por un fluido en la que está en suspensión. Las partículas van deformando plásticamente la superficie impactada, produciendo sobre ella una apariencia granular fina, similar a la de las fracturas frágiles. La velocidad de desgaste por erosión aumenta con la velocidad de las partículas y si los ángulos de impacto son pequeños predomina el corte abrasivo; siendo la dureza superficial un factor crítico.



**Fig. 2.9: Desgaste por erosión**

Si por el contrario, los ángulos de impacto son grandes el desgaste es debido principalmente a deformación y fractura. El desgaste de tipo erosivo se presenta, por ejemplo, en equipos y líneas de bombeo para fluidos con sólidos en suspensión, boquillas para equipos para granallado por arena, etc.

#### **2.5.4. Desgaste por fatiga**

Este tipo de desgaste se produce por la aplicación reiterada de cargas que producen tensiones sobre las capas superficiales, creando fisuras sobre las mismas; cuando estas propagan, se desprende el material. El caso más estudiado de este tipo es en rodamientos, donde las bolillas producen cargas cíclicas sobre las pistas.

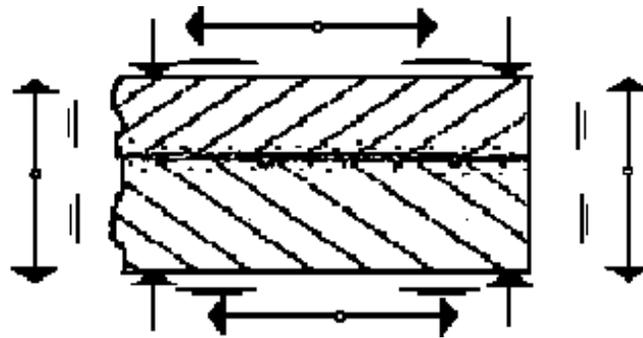
#### **2.5.5. Desgaste por corrosión**

La corrosión es la reacción superficial de muchos metales con el medio ambiente, creándose películas superficiales, como por ejemplo óxidos. Usualmente estas películas son muy duras y crean una protección sobre el material; luego, el espesor de las mismas crece excesivamente, volviéndose frágiles y propensas a ser removidas; una vez que se desprenden, dejando expuesto al material, el proceso vuelve a comenzar. A su vez, y como las partículas son duras, se convierten en un tercer cuerpo, por lo que produce desgaste abrasivo.

El desgaste corrosivo no actúa independientemente, sino que está relacionado con otro mecanismo, inclusive se le considera no un mecanismo base sino que es un colaborador de los otros.

#### **2.5.6. Otros mecanismos**

En los casos prácticos interactúan varios mecanismos entre sí. Un caso típico es el de desgaste micro-oscilatorio o fretting corrosivo. (Fig. 2.10). Esta forma de deterioro se caracteriza por la pérdida de material de superficies en contacto, bajo la acción de una carga y de movimiento deslizante de amplitud muy pequeña (130  $\mu\text{m}$ , por ej.). El término corrosivo está ligado al color que tienen las partículas (rojo pardusco) desprendida de las superficies. En general el fretting corrosivo es la combinación de adhesión, abrasión, corrosión y en algunos casos con un agregado de fatiga; el proceso comienza con una adhesión, luego las partículas (una vez oxidadas) actúan en forma de granos abrasivos, prolongando su permanencia debido a la baja amplitud de la oscilación.



**Fig. 2.10: Desgaste micro-oscilatorio (“Fretting”)**

## 2.6. Clasificación del desgaste

La clasificación más simple de interacciones entre superficies que envuelven una u otra es, el desgaste suave y el desgaste severo. Esta clasificación no está basada realmente en algún valor numérico en particular de la tasa de desgaste. No obstante, un tanto sobre las observaciones generales que para algunos pares de materiales se hacen, por ejemplo al incrementar severamente la carga normal y/o velocidad de deslizamiento o rango de temperatura, conducen en alguna fase a saltos repentinos comparativamente en la tasa de desgaste. Las diferencias observadas más generales entre los dos regímenes de desgaste suave y desgaste severo entre una gran variedad de sistemas metálicos de deslizamiento son resumidas en la tabla 2.3.

| Desgaste Suave   | <b>Desgaste Severo</b>  |
|--|---|
| Resultan superficies muy lisas   | Resultan superficies muy rugosas<br>Marcas de superficie profundas, más rugosas que la original |
| Debris(escombros) muy pequeños, generalmente solo 100nm de diámetro    | Debris(escombros) metálicos más largos, típicamente por encima de 0.01mm de diámetro            |
| Resistencia eléctrica de contacto alta, contacto metálico real pequeño | Resistencia eléctrica de contacto baja<br>Se forman juntas metálicas                            |

**Tabla 2.3: Diferencia entre desgaste suave y desgaste severo**

Es importante hacer notar que estas diferencias entre el desgaste suave y el desgaste severo no se hace presumiendo los reales mecanismos físicos que operan en cada régimen de los cuales han sido identificados abundantemente. El desgaste puede ser causado por adhesión, por abrasión, por delaminación, por oxidación, por corrosión, así como también una variedad de otros fenómenos. El punto de comienzo común en la investigación de cada campo complejo es hasta ahora la ecuación de desgaste de Archard, la cual asevera que la tasa de desgaste TD, es directamente proporcional a la carga  $F_n$  en el contacto e inversamente proporcional a la dureza de la superficie D del material menos duro, es decir que;

$TD \propto F_n / D$ , esto es:

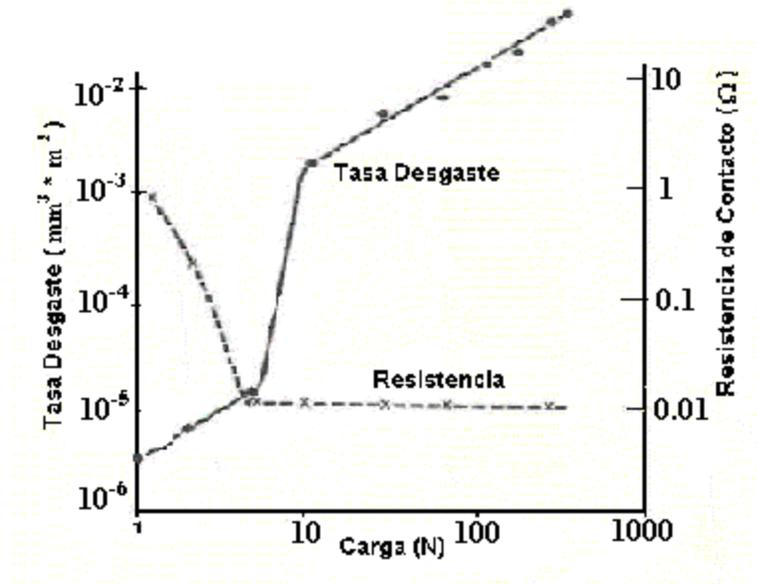
$$TD = k * F_n / D \dots \dots \dots \text{ec. 2.6}$$

La constante k es adimensional y se conoce como el coeficiente de desgaste y conocer su valor es obviamente vital en cualquier intento para la aplicación de la ecuación anterior de manera predictiva. En situaciones prácticas de ingeniería la dureza D del estrato superior del material en el contacto no se conoce con cierta certeza, y por lo tanto más usual de cuantificar solo el valor de k, es conocer el valor de la relación  $k / D$ . Esta relación se conoce como tasa de desgaste específica y es generalmente contabilizada en unidades de  $\text{mm}^3 * \text{N}^{-1} * \text{m}^{-1}$ . Esto representa el volumen de desgaste en  $\text{mm}^3$  por unidad de distancia deslizada en metros por unidad de carga normal en Newton.

### **2.6.1 Diferencias entre el desgaste suave y el desgaste severo**

El comportamiento en un ensayo con material de latón al plomo deslizando contra una superficie de menor dureza, se ha estudiado con detenimiento y demuestra las condiciones características de la transición de desgaste suave a desgaste severo, para muchas combinaciones de otros materiales en una forma clara y repetida. En la Fig 2.11 (Hirst, W. y Lancaster, J.K. 1956) se muestra la gráfica de la tasa de desgaste respectiva para un cilindro con el material mencionado, deslizando contra un anillo de stellita endurecida como una función de la carga

normal. La stellita es una aleación no ferrosa con 42-65% de Co y 25-40% de Cr con W(5-20%) y C. Son muy duras e inoxidables, con 1.75 – 2.70% de C, manteniendo una dureza Rockwell c de 58-60 que mantienen a temperatura elevada, y una notable resistencia a la abrasión.



**Fig. 2.11: Gráfica de tasa de desgaste y resistencia eléctrica de contacto para un seguidor de latón al plomo deslizando contra un anillo de material de stellita endurecida como una función de la carga normal aplicada.**

En cargas bajas la tasa de desgaste se incrementa de acuerdo a la ec.2.6,  $TD = k * F_n / D$ , con una tasa de desgaste hasta un valor de  $2E-04 \text{ mm}^3 * \text{m}^{-1}$ . Sin embargo, para una carga entre 5 y 10 N hay un agudo incremento en la tasa de desgaste por un factor de cerca de 100. Alcanzado este punto, el comportamiento en la tasa de desgaste es favorablemente bien descrito por la ecuación de Archard aunque ahora su valor es  $\cong 1E-04 \text{ mm}^3 * \text{m}^{-1}$ . Además en la gráfica se muestra el grado de contacto metálico que se puede estimar mediante la resistencia eléctrica de contacto entre la junta del pin (seguidor) y el anillo. La transición en el régimen de desgaste suave a desgaste severo, esta asociada con una significativa caída en la resistencia eléctrica, indicando un tanto el grado más alto de verdadero contacto entre los dos materiales.

Las dificultades de los modelos y predicciones de la tasa de desgaste en la práctica puede anticiparse de la Tabla 2.4 (Archard, J.F. y Hirst, W. 1956), la cual provee una indicación de los

valores observados del coeficiente de desgaste  $k$  para un número de pares tribológicos con deslizamiento en seco. Diversos tópicos emergen de esta tabla.

| <b>Material</b>                   | <b>k</b> |
|-----------------------------------|----------|
| Acero (sobre acero)               | 7.0E-03  |
| Latón                             | 6.0E-04  |
| PTFE                              | 2.5E-05  |
| Aleación Cobre-Berilio            | 3.7E-05  |
| Acero endurecido para herramienta | 1.3E-04  |
| Acero perlítico inoxidable        | 1.7E-05  |
| Polietileno                       | 1.3E-07  |

\*PTFE Politetrafluoretileno

**Tabla 2.4: Valores típicos de coeficientes de desgaste  $k$  con deslizamiento en seco. Se utilizó acero para herramienta como material para desgastar sin lubricación con ensayo de tipo esfera sobre disco (pin-on-disk) en aire. En todas las pruebas los coeficientes de fricción están en el rango  $0.18 < f < 0.8$**

Primeramente el valor numérico de  $k$  es siempre menor que la unidad, generalmente un tanto más pequeño. Segundo el rango de los valores para los coeficientes de fricción caen entre 0.18 y 0.80; mientras que el rango de los valores en los coeficientes de desgaste es mucho más grande, es decir, 1.30E-07 y 7.0E-03.

Los coeficientes de desgaste en seco pueden variar un tanto como 4 a 5 ordenes de magnitud; mientras que el coeficiente de fricción en contacto deslizante seco es menor que uno. No obstante en forma cualitativa, es razonable esperar situaciones en las cuales hay fuerzas friccionales muy altas para que involucre un desgaste relativamente más alto.

Es bastante posible para combinaciones de materiales para producir fuerzas de fricción similares, aunque muy diferente comportamiento al desgaste. Si las condiciones son más severas (por ejemplo, incrementando la carga; o velocidad de deslizamiento) entonces los cambios en el coeficiente de fricción  $f$  no serán muy grandes. Hay probabilidad de que sean más significativos los cambios en el coeficiente de desgaste  $k$ .

## 2.7. Teorías sobre el desgaste deslizante de aceros en ausencia de lubricantes

### 2.7.1. Teoría de adhesión

La teoría adhesiva de la fricción (Tabor, D. 1973), la cual dio origen a una teoría general del desgaste por adhesión, se basa en que las superficies, aun teniendo el mejor acabado posible y siendo en escala macroscópica en apariencia lisas, en realidad presentan una micro-topografía irregular de asperezas, en forma de crestas y valles. Es así, que cuando dos superficies se colocan una junto a otra bajo la acción de una carga, el contacto solo se produce en las crestas de las asperezas y el área real que soporta la carga es, por esto, mucho más pequeña que el área aparente de contacto.

En las minúsculas regiones donde los dos cuerpos se unen íntimamente, si las dos superficies están limpias, los átomos de ambas se atraen mutuamente y se produce una fuerte adhesión. En el caso que existan contaminantes superficiales tales como óxidos, la adhesión se vería disminuida, pero existiría de todos modos, a causa de las altas presiones que se generan debido al área tan pequeña que soporta la carga. Estas altas presiones romperían las capas contaminantes y permitirían el contacto directo entre ambas superficies.

En el caso de metales, estos enlaces atómicos son llamados “uniones soldadas en frío”. Si se produce deslizamiento, estas uniones se rompen; siendo la fuerza necesaria para su destrucción la principal causa de la fricción. Si además una de las superficies es más dura que la otra, las asperezas de la primera producen surcos en la segunda; considerándose la fuerza necesaria para producir los surcos, como un segundo componente de la fricción.

Según la teoría adhesiva del desgaste (Wright, K. 1973), la formación de enlaces interatómicos es solo la primera etapa de un mecanismo de deterioro y no produce directamente pérdidas de material. De acuerdo a su postulante, las minúsculas áreas de contacto, sufren fluencia y alcanzan un cierto grado de deformación plástica. Al producirse el deslizamiento esas zonas pueden ser sometidas a endurecimiento por deformación y el corte puede ocurrir en el material de menor dureza. Esto ocasionaría que se transfieran fragmentos

de material de una superficie a la otra; pudiendo estos permanecer por un tiempo relativamente largo en la nueva superficie o viajar repetidamente entre ambas.

Otros mecanismos, como la fatiga y/o la abrasión, serían los responsables del desprendimiento de los fragmentos y de su salida del sistema.

La abrasión, la cual se considera un mecanismo complementario en el desgaste adhesivo, es una forma de deterioro causada por partículas duras que interactúan con una superficie ocasionando desplazamiento de material. Se considera que la abrasión puede tomar dos formas extremas: una en la cual la deformación plástica es lo más importante y la otra en la cual la fractura, con deformaciones plásticas limitadas, es lo que predomina (Moore, M.A. 1974-1981).

Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones de otra superficie o bien partículas sueltas; sin embargo, en el estudio de las interacciones entre dos cuerpos deslizantes es de más interés la abrasión causada por partículas incluidas, llamada abrasión entre dos cuerpos.

Hay que tener en cuenta por otra parte, que en la mayoría de los sistemas las partículas desprendidas no son inmediatamente removidas y debido a que generalmente son endurecidas, ejercen una acción abrasiva mientras que no salen de la zona de contacto. Este último, sin embargo, es mucho menos importante que el primero (Wright, K. 1973).

Un mecanismo alternativo propuesto por Archard, J.F. , en 1953, es llamado comúnmente Teoría Adhesiva del Desgaste. Este mecanismo se basa en la probabilidad de que en cada encuentro entre las asperezas se produzca una partícula de desgaste. Estas partículas serían de forma hemisférica y de radio igual al de la región de contacto, la cual asumió circular.

La teoría establece que:

$$V.D. = \frac{k * F_n * d}{3 * D} \quad \text{ec. 2.7}$$

Donde V.D. es el volumen de desgaste,  $k$  una constante de proporcionalidad,  $F_n$  la carga aplicada,  $d$  la distancia deslizada y  $D$  la dureza del material más blando.

Esta ecuación predice que el desgaste es proporcional a la distancia deslizada y a la carga aplicada, e independiente del área aparente de contacto. En este contexto, la constante  $k$  es una medida de la probabilidad de que en un encuentro localizado se produzca una partícula de

desgaste y se puede esperar que esté relacionada con las condiciones superficiales. Las transiciones de desgaste suave a severo y viceversa serían consideradas por cambios en el valor de  $k$  (Hirst, W. 1957-1958). Según investigaciones posteriores, las transiciones podrían ser atribuidas a cambios en la dureza del material más blando (Welsh, N.C 1965).

### **2.7.2. Teoría de la delaminación**

Esta teoría postulada por Suh, N (1973) y denominada teoría de la delaminación para velocidades de deslizamiento bajas, trata de explicar, en primera instancia, la forma laminar de las partículas de desgaste detectadas bajo esas condiciones.

Esta teoría postula que en el contacto entre dos superficies se transmiten fuerzas normales y tangenciales a través de los puntos de contacto. Las asperezas de la superficie menos dura son fácilmente deformadas y fracturadas por los repetidos ciclos de carga, mientras que las asperezas de la otra superficie también son fracturadas, pero a velocidades menores. Como resultado de este proceso se genera inicialmente una superficie relativamente lisa, en la cual la fuerza tangencial ejercida en los puntos de contacto induce deformaciones plásticas superficiales y sub-superficiales.

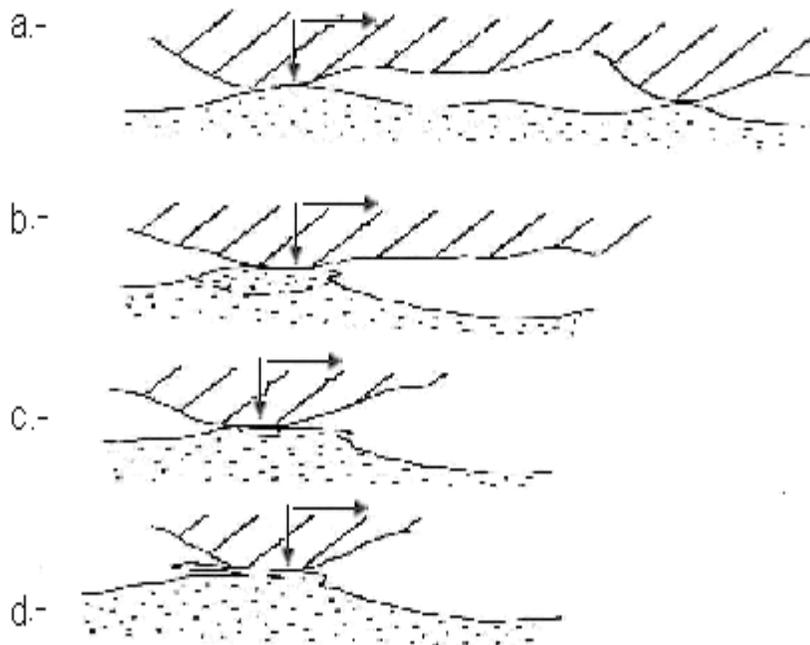
Estas deformaciones aumentan con cada ciclo de carga y se van acumulando progresivamente. A medida que la deformación sub-superficial progresa se van nucleando grietas a cierta distancia por debajo de la superficie, fuera de la influencia del estado triaxial de esfuerzos de compresión que existe en las cercanías de la región de contacto. (Este estado de esfuerzos no permite la formación de grietas). Una vez que se nuclean las grietas las deformaciones subsecuentes causan su propagación y la unión de grietas vecinas. El crecimiento de las grietas tiende a ser paralelo a la superficie, a profundidades que estarían en función de las propiedades del material y del estado de esfuerzos a que está sometido en esa región. Cuando las grietas alcanzan la superficie se produce el desprendimiento del material, en forma de láminas largas y delgadas.

En referencia a esta teoría, Samuels, L.E.; Doyle, E.D.; y Turley, D.M. (1981) mencionan experimentos en el interior de un microscopio electrónico de barrido, que demuestran que las partículas laminares pueden ser generadas por mecanismos completamente diferentes al postulado por la teoría de la delaminación. También hace referencia a otros experimentos donde

se determinó que la delaminación del tipo general observado por Suh, puede ocurrir durante un solo paso de una aspereza y concluyen que aunque la existencia de la delaminación está bien establecida, la formación de las partículas laminares está todavía abierta a interpretación.

La teoría de la delaminación involucra los siguientes pasos ilustrados en la figura 2.12.

- a.- Fuerzas normales y tangenciales son primeramente transmitidas a través de los contactos de las asperezas, las cuales se deforman alisando la superficie.
- b.- Ocurre deformación plástica en las capas superficiales.
- c.- Se forman grietas paralelas bajo las capas superficiales.
- d.- Estas grietas crecen hasta alcanzar una longitud crítica y el material entre la superficie y la grieta se corta en la parte más débil, para producir una partícula de desgaste (Suh, N.P. 1973)



**Fig. 2.12: Representación esquemática para la formación de una partícula de desgaste por delaminación**

### **2.7.3. Teorías de desgaste relacionadas con mecánica de fractura y teoría de dislocaciones**

Otro enfoque que se ha utilizado para tratar de explicar el desgaste por delaminación está relacionado con la mecánica de fractura.

Rosenfield, A.(1981) inicialmente considera a los materiales como linealmente elásticos y destaca la importancia de la fatiga y de la fricción entre las caras de las grietas, en la formación de las partículas de desgaste de tipo laminar: en su trabajo concluye que aunque este enfoque puede ser útil para arrojar alguna luz, sobre el problema, particularmente para materiales frágiles, es necesario tomar en cuenta la plasticidad de los materiales, cuando estos son tenaces.

A este respecto, posteriormente propuso un modelo elasto-plástico (Rosenfield, A. 1981), mediante el cual se predice el crecimiento de grietas; algo que no hacía el modelo original. En este nuevo modelo se considera la existencia de una zona plástica en el borde de avance de la grieta y se termina proponiendo una ecuación muy similar a la de Archard.

Además, se afirma que siempre habrá la posibilidad de crecimiento de grietas, si la fricción entre las caras de las mismas no es muy grande y que hay un estado de esfuerzos, el cual de ser alcanzado, implicará que cualquier grieta que se forme crecerá catastróficamente. También el modelo permitiría predecir las transiciones de la Tasa de Desgaste con la carga, las cuales se producirían cuando esta última alcanza valores críticos, dependientes de la resistencia a la fluencia del material y del coeficiente de roce del tribosistema.

Por otra parte, Kuhlman, W. (1981) utiliza conceptos de teoría de dislocaciones y asume que los puntos de contacto son del orden de 0,1 mm de diámetro, mientras que las asperezas serían del orden de un micrón ó menores. Bajo estas hipótesis considera que las asperezas de los bordes son las que ejercen la interacción mecánica, que produce el patrón de rayas de poca profundidad presentes en superficies desgastadas. Las dos superficies en contacto se deformarían debido a esfuerzos de corte producidos por tracciones tangenciales. Estas deformaciones cesan cuando el esfuerzo de fluencia local, aumentado debido al endurecimiento por deformación, se iguala al esfuerzo de corte resuelto en los sistemas activos de deslizamiento.

Se asume que cada capa paralela a la superficie actúa independientemente de las adyacentes y que en ellas los efectos de la velocidad de deformación son despreciables. Durante el período inicial, migraciones de los puntos de contacto generarían una capa superficial bastante uniforme endurecida por deformación de corte. Sin embargo, durante este período también toman lugar desprendimientos de asperezas en áreas localizadas y transferencia de partículas entre las superficies.

El desgaste por delaminación comienza a predominar posteriormente, alcanzándose una Tasa de Desgaste constante. Este fenómeno ocurriría cuando el esfuerzo de fluencia del más blando de los dos materiales sea una función creciente monótonica de la deformación acumulada. En estas condiciones se debe alcanzar un límite, más allá del cual el material no puede ser deformado y se agrieta. Este agrietamiento resultaría en delaminación, a causa de la uniformidad esencial de la historia esfuerzo-deformación y de las propiedades mecánicas de las capas paralelas a la superficie (a pesar de que actúan prácticamente independientes unas de otras).

El análisis de los procesos mencionados se complica, pues el esfuerzo de fluencia de las capas superficiales sujetas a corte y el del volumen del material no son iguales y están sujetos a diferentes efectos: diferencias de texturas cristalográficas y gradientes de temperatura que se producen en el deslizamiento. Esta teoría es relacionada por el autor con observaciones de las estructuras de las dislocaciones por debajo de huellas de desgaste y su comparación con las estructuras observadas en alambres trefilados. Basándose en tales comparaciones, afirma que las dislocaciones se comportan de acuerdo a las condiciones locales de esfuerzo y deformación, “sin la intervención obvia de los conocidos efectos peculiares que ocurren en las superficies”.

#### **2.7.4. Teorías relacionadas con fatiga**

Un enfoque interesante que apunta al estudio fundamental del problema se debe a Kragelskii, I.V. (1981) y su grupo de colaboradores. Este investigador resalta tres periodos en los procesos de desgaste: la etapa de rodaje, la de estado estable y el desgaste severo].

En la primera de ellas se producen altas temperaturas, desgaste rápido de las asperezas más expuestas al contacto y deformaciones intensivas de las restantes asperezas. Estos procesos inducen la conformación de un nuevo patrón de rugosidad, que se reproduce en el tiempo y que

no está relacionado con el original. Además, el endurecimiento debido a las deformaciones promueve las condiciones para que se establezcan contactos de tipo elástico; a su juicio, condición esencial para obtener desgaste mínimo y fuerzas de roce estables.

El período de estado estable se presentaría bajo estas condiciones y el desprendimiento de partículas se produciría como resultado de numerosos ciclos de carga. Estos ciclos de carga son explicados basándose en un modelo de interacción entre una aspereza dura en movimiento, contra una superficie más blanda. En la zona por delante de la aspereza, el material blando que todavía no ha sido alcanzado por aquella, es sometido a un esfuerzo de compresión. Por el contrario, el material que va siendo dejado atrás está sujeto a tracción.

De esta manera, cada porción del material blando es sometida a deformaciones repetidas de signo contrario; ocasionando cambios físicos y químicos en él, e induciendo el desprendimiento de partículas por un mecanismo de fatiga. Se considera así al desgaste como un proceso acumulativo, lo cual sería la única explicación posible al hecho que materiales duros puedan ser desgastados por materiales blandos (caso de pérdida de filo en herramientas).

En otro trabajo (Kragelskii, I.V y Marchenco. E.A. 1981), se considera al desgaste como consecuencia de interacciones de doble naturaleza: adhesión y deformación mecánica. Se discuten además, los efectos de las capas de óxido, como inhibitorias de las interacciones adhesivas y se sugiere que la adhesión sería suficientemente grande para inducir desgaste por fatiga, pero muy pequeña para producir desprendimientos sustanciales de material. Si esto último ocurriera sistemáticamente, significa que el tribosistema es inadecuado.

Kimura, Y. en 1980, revisa diferentes mecanismos que involucran a la fatiga en la explicación del fenómeno del desgaste.

En este trabajo se llama la atención sobre las observaciones microscópicas de las superficies desgastadas, de las correspondientes capas subsuperficiales y de las partículas de desgaste; indicando claramente todas ellas, que durante el desgaste operan mecanismos de fatiga. Sin embargo, reconoce que son escasas las evidencias concluyentes para demostrar la correlación cuantitativa entre la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga. Soom, A. y Kim. C. (1983), por otra parte, han estudiado las fluctuaciones en las fuerzas normales y friccionales, y las

atribuyen a interacciones entre las rugosidades y a ondulaciones de las superficies deslizantes. Estas fuerzas dinámicas pueden, a juicio de los autores, tener un importante papel en la relación desgaste-fatiga, ya que a las frecuencias consideradas por ellos (2Khz), rápidamente se alcanzan varios millones de ciclos.

Utilizando un enfoque diferente, Vingsbo, O. y Hogmark, S. (1981), intentan identificar los eventos presentes en el proceso de desgaste, a partir de los gradientes de microdureza subsuperficial encontrados en diferentes condiciones experimentales. Basándose en esto, proponen mecanismos separados de adhesión, de abrasión y de fatiga superficial, y consideran que en cada caso todos estos mecanismos pueden estar presentes y que además pueden competir. El predominio de unos mecanismos sobre otros sería dependiente de las condiciones de funcionamiento. Este concepto de competencia de diversos mecanismos es compartido por varios autores. (Welsh, N.C. 1965; De Gee, A.W. 1979; Kragelskii, I.V. 1981; Leach, P.W. 1984 y Blau, P.J. 1983).

### **2.7.5. Teoría del desgaste oxidativo**

Otros trabajos importantes se deben a Quinn, T. et al (1980-1985), quienes explican el régimen de desgaste suave en términos de eventos relacionados con la oxidación de las superficies. El régimen citado sería consecuencia de un balance entre la remoción de las películas superficiales oxidadas y la generación de nuevas capas de óxido, debido a la difusión de oxígeno y/o iones metálicos, a las altas temperaturas que normalmente se alcanzan en las áreas reales de contacto. El desgaste suave siempre sería precedido por un periodo inicial de desgaste severo, conocido como "rodaje", el cual es un proceso transitorio, probablemente con altas deformaciones plásticas en las áreas reales de contacto. El desgaste oxidativo ó corrosivo comenzaría una vez que la capa de óxidos alcance un espesor crítico, más allá del cual se hace mecánicamente inestable. En sus trabajos, los autores citados demuestran que es posible describir las tasas de desgaste suave matemáticamente, en función de las variables operacionales y de las constantes oxidacionales apropiadas. Según ellos, las tasas de desgaste son proporcionales a la carga mientras el tipo de óxido no cambie. Los cambios bruscos de temperatura superficial, por otra parte, irían acompañados de variaciones súbitas de la tasa de desgaste. El número de

asperezas en contacto sería linealmente dependiente de la carga para un rango de velocidad de oxidación determinado y el radio de cada contacto inter-aspereza sería aproximadamente constante para cada combinación de materiales. El espesor crítico de la capa de óxidos sería aproximadamente de dos micrones ( $2\mu\text{m}$ ), constante para todas las condiciones estudiadas por ellos. Según esta teoría, la dependencia con la carga, de la temperatura a la cual ocurre la oxidación en las áreas reales de contacto, tiende a seguir el mismo patrón que la variación de la temperatura superficial. Esto explicaría el incremento lineal de la Tasa de Desgaste con la carga antes ó después de las transiciones, pues un incremento en la primera aumentaría la velocidad de oxidación, de manera que se alcanzaría el espesor crítico más rápidamente

Finalmente, las transiciones son explicadas basándose en un cambio en la naturaleza de los óxidos que se forman a aquellas cargas, a las cuales se producen los cambios bruscos en la Tasa de Desgaste.

Otro mecanismo transicional relacionado con esta teoría ha sido propuesto recientemente por Glascott et al (1984). Estos autores atribuyen la transición de desgaste severo a suave (período inicial de rodaje-período estable) a un proceso de pulverización de las partículas desprendidas, hasta que se hacen lo suficientemente pequeñas para que ocurra oxidación sustancial de ellas y comiencen a actuar como lubricantes.

Por otra parte, los regímenes de desgaste suave y severo son relacionados por Quinn, T y sus asociados (1980-85), con los conceptos de desgaste oxidativo y desgaste por delaminación, respectivamente. Es de hacer notar, en este punto, que otros autores sugieren que el desgaste suave es debido a delaminación (Rosenfield, A. 1981); que bajo condiciones de lubricación el desgaste suave es debido a la fatiga y el severo a mecanismos de adhesión (Iwai, Y. y Kichiro, E.1982) [32,43 Vasquez]; que el desgaste suave está relacionado con contactos elásticos y el severo con contactos plásticos (Kragelskii, I.V. 1981) ó que por el contrario el desgaste severo se debe a delaminación y que a bajas velocidades no se producen contactos de tipo adhesivo (Abrahanson, E.P. 1974).

### **2.7.6. Teoría del deterioro cíclico**

Este mecanismo de desgaste propuesto por Blau, P.J. (1981), sugiere un proceso de deterioro cíclico superficial, el cual contempla cuatro etapas para la formación de partículas de desgaste. Este proceso conjuntamente con otros tres: transferencias de una superficie a otra, formación-remoción de películas de óxido y generación de partículas de desgaste que permanecen en la zona de contacto, es considerado entre los causantes de transiciones en el desgaste deslizante de metales en ausencia de lubricantes. El modelo de deterioro superficial mencionado considera cuatro etapas en cada ciclo: inicialmente se produce deformación plástica, lo cual origina una capa altamente deformada.

La segunda etapa consiste en la generación de partículas laminares, por inicio y crecimiento de grietas en dicha capa, en forma similar a la propuesta por Suh, N (1973).

En tercer lugar se produce el desprendimiento de las partículas, dejando zonas en bajorrelieve y mesetas sensiblemente planas. Estas mesetas son las que soportan la carga y a medida que se van generando las partículas de desgaste, la carga sobre aquellas aumenta. Las mesetas son eventualmente desplazadas sobre su superficie de fractura, produciendo surcos profundos por debajo del nivel de las mesetas no desplazadas.

El cuarto evento es el desprendimiento de las restantes mesetas. Las últimas de las cuales son rápidamente desplazadas. La superficie de la contra-cara entra entonces en contacto con la superficie que se encontraba previamente en bajorrelieve; produciendo su alisamiento y la repetición del ciclo.

Estos eventos son consistentes con topografías observadas en huellas de desgaste y según Blau, parecen explicar el origen de ciertos rasgos superficiales y de microestructura subsuperficial, observados en metales severamente desgastados.

### **2.7.7. Otras teorías**

En un intento por producir una ecuación mecánica del desgaste, Halling, J.(1983) atribuye la forma de las llamadas leyes del desgaste adhesivo y abrasivo, a la naturaleza de la distribución de las asperezas en las superficies.

Haciendo uso de conceptos relacionados con las propiedades mecánicas de los materiales, los mecanismos de la formación y el tamaño de las partículas de desgaste, modifica las ecuaciones de las citadas leyes. Este proceso teórico le conduce a reconocer la importancia de los factores que estarían involucrados en la constante específica de desgaste  $k$ ; particularmente el papel de la ductilidad y de las películas superficiales.

Un original modelo propuesto por Klamecki, B.E. (1980) considera el problema de dos superficies en contacto deslizante, una de las cuales se desgasta mucho más que la otra.

Este proceso es idealizado asumiendo al material que se desgasta más, como un cuerpo aislado, al cual se le suministra calor y trabajo y se le permite que pierda masa. Partiendo de la consideración de que en un sistema aislado sometido a algún proceso, la producción de entropía debe ser positiva, se desarrolla una condición límite en forma de inecuación. En esta condición se relacionan trabajo, calor, potencial químico y energía superficial, y se predice un límite para los posibles procesos y comportamientos del material en el sistema.

## **2.8 Efectos de las variables más importantes**

### **2.8.1 Carga normal**

En general, el desgaste aumenta con la carga, pero existen excepciones a este comportamiento.

Considerando que el coeficiente de roce no depende de la carga, entonces un aumento de esta se convertiría en una mayor energía friccional que se introduce al sistema. Esta energía tiene que ser disipada como calor o absorbida en la deformación y fractura de las capas superficiales, y si se mantiene la relación entre esas dos porciones de la energía, tendremos entonces que a mayor energía friccional habrá mayor desgaste.

Ajustada a este concepto, la teoría de Archard, J.F (1953) predice que el desgaste aumenta en proporción directa al aumento de la carga. Posteriormente Welsh, N.C. (1965) ha demostrado que pequeños aumentos de la carga provocan las llamadas transiciones T1, T2, y T3; las cuales se manifiestan como cambios bruscos en la Tasa de Desgaste. Welsh encontró además, que generalmente existe una dependencia lineal entre la Tasa de Desgaste y la carga, siempre que no haya cambios de régimen de desgaste (rangos de carga que no incluyan las transiciones).

En ese trabajo también se detectó, en algunos casos, que la dependencia fue lineal entre los logaritmos de ambas variables. Además se encontró, que debido al aumento de la carga y como consecuencia de altas temperaturas friccionales, eventualmente se producían transformaciones de 3 fases superficiales, resultantes en capas muy duras, no atacables metalográficamente y de alta resistencia al desgaste.

En referencia a periodos iniciales transitorios (rodaje), Kragelskii, I.V. (1981) afirma que la Tasa de Desgaste varía proporcionalmente con la carga específica (presión nominal). Lipson, Ch. (1967), por su parte, reseña que el desgaste aumenta casi proporcionalmente con la carga, aunque esta relación es afectada por el calor friccional producido en la intercara de contacto. También propone como aproximación, que a niveles de esfuerzos por debajo de 1/3 de la Dureza Brinell (aproximadamente el límite de fluencia) el desgaste es independiente de la carga, presumiblemente por no haber deformaciones plásticas.

Esta recomendación tiene mucha similitud con el concepto de “desgaste cero” de Bayer, R.G. y Wilson, J.T. (1971), quienes proponen limitar el esfuerzo de corte máximo a 0.54 de la resistencia a la fluencia en corte, para que el desgaste este restringido a la mitad de la altura de las asperezas de la superficie más rugosa. Bowden, F.B. y Tabor, D. (1954-1964), afirman que el área real de contacto es prácticamente proporcional a la carga, para un amplio rango de condiciones superficiales. Así el área real de contacto es expresada por ellos como:

$$A_r = \frac{F_n}{D} \dots\dots\dots \text{ec. 2.8}$$

Donde:

$F_n$ : carga normal aplicada

$D$ : dureza del material mas blando de los dos (suponiendo condiciones de contacto plástico)

$A_r$ : área real de contacto.

Sin embargo, es interesante considerar lo que ocurre para la condición extrema de carga inexistente ( $F_n = 0$ ), y a partir de allí, estudiar el resultado de una variación continua de la carga. se podría comenzar afirmando que para una carga cero, no existiría contacto y en consecuencia

no habría desgaste. Para una carga muy pequeña, la mayoría de los contactos serían de tipo elástico y las asperezas cargadas con esfuerzos por debajo de su límite de fatiga, tampoco sufrirían desgaste. En la medida que se aumenta la carga se ira superando el límite de fatiga de una considerable porción de las asperezas del material, en consecuencia, el desgaste tomaría lugar a través de un mecanismo de fatiga. Finalmente, para cargas mas altas se producirían contactos plásticos, en cuyo caso cobraría validez la ecuación anterior y la mayoría de las conclusiones publicadas en la literatura. Basados en lo anteriormente dicho y bajo la suposición de que es cierto, entonces mientras no se alcance el límite elástico de las asperezas, el área real de contacto no sería dependiente de la carga y podría considerarse al desgaste como función de la presión aparente. Al alcanzarse el estado de deformación plástica en las asperezas, el desgaste ya no sería dependiente de la presión aparente, sino dependiente de la carga, como ha sido observado por diferentes investigadores.

### **2.8.2 Distancia deslizada o tiempo**

Antes que nada, se debe establecer, que el desgaste aumenta con el tiempo de funcionamiento (Tabor, D. 1977) en casi todos los casos conocidos. Sin embargo, en algunas ocasiones se transfieren fragmentos de material de una superficie a otra sin pérdida de peso neta. En otros casos puede ocurrir un apilamiento del material desgastado; ocasionando separación de las superficies (Hirst, W. 1967-1968). Bajo esta condición, si el desgaste es medido basándose en el desplazamiento relativo de los cuerpos, puede ser detectado un desgaste aparentemente negativo. Este efecto también podría presentarse debido a elevación de temperatura en el periodo inicial de funcionamiento. Podría suceder, que se eleve la temperatura de tal manera, que se vería compensado el desgaste producido en el proceso por medio de la dilatación de los cuerpos debida a las altísimas temperaturas, por tanto se debe dejar que se estabilice la temperatura para después medir el desgaste real.

Una referencia mas precisa sobre el efecto del tiempo de funcionamiento o su equivalente la distancia deslizada, es hecha por Lipson, Ch (1967). Este autor reseña trabajos donde se ha reportado una relación lineal entre el desgaste y el logaritmo de la distancia para los periodos iniciales, tornándose luego en una relación exponencial a medida que avanza el proceso. A pesar

de esto el autor afirma en su escrito que “la Tasa de Desgaste es proporcional a la distancia recorrida”, lo que es falso según la evidencia experimental.

Archard, J.F. por otra parte, en 1953 había observado una relación lineal del volumen desgastado con el tiempo y en 1957, Welsh, N.C. encontró un comportamiento citado luego por otros autores, donde se observa la relación lineal desgaste-tiempo, pero se diferencian dos patrones característicos. En el desgaste severo, la Tasa de Desgaste comienza siendo alta y permanece constante a lo largo del ensayo(Fig. 2.13)

En el régimen suave, la Tasa de Desgaste también es elevada en el periodo inicial, pero luego disminuye marcadamente, después de un corto intervalo y se mantiene estable durante un tiempo prácticamente indefinido, como se puede observar en la Fig. 2.14.

En particular, en el rango de cargas por debajo de  $T_1$ , el desgaste suave se desarrolló generalmente en forma muy rápida y el período de desgaste severo no siempre fue fácil de distinguir (Welsh, N.C. 1965). Además el comportamiento a las cargas mas bajas, no fue completamente reproducible; siendo el desgaste severo largo algunas veces y muy corto en otras.



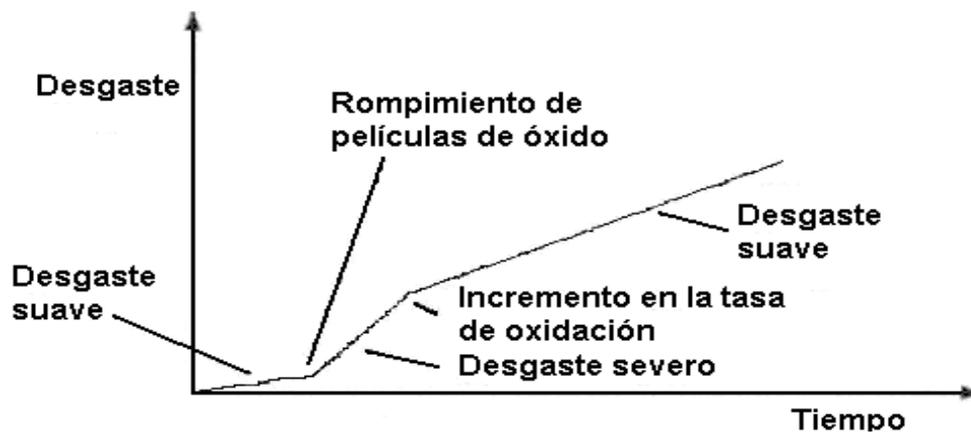
**Fig. 2.13: Patrón característico de desgaste de aceros(Desgaste severo)**



**Fig 2.14: Patrón característico de desgaste de aceros(Desgaste suave)**

Es interesante también reproducir un gráfico presentado por Wright, K. (1973) (Fig. 2.15), donde se muestra un periodo inicial de desgaste suave, atribuido al efecto lubricante de los óxidos superficiales. Posteriormente y como consecuencia del rompimiento de la capa de óxidos se presenta un régimen de desgaste más pronunciado que el anterior.

Por último, a causa de incrementos en la velocidad de oxidación ó contaminación, la Tasa de Desgaste podría establecerse al mismo nivel inicial. Es posible que esta variedad de comportamiento se deba no únicamente a la oxidación, sino a varios de los efectos discutidos en este capítulo



**Fig. 2.15: Efecto de la oxidación en el desgaste**

### 2.8.3. Velocidad de deslizamiento

En principio se establece para esta variable una situación particular, si el movimiento es traslación rectilínea, entonces la velocidad no puede ser modificada en el diseño; mientras que cuando el movimiento es rotacional, aumentos o disminuciones de diámetro, implican mayores o menores velocidades de deslizamiento. Debido a esto, la velocidad es una variable que puede ser modificada, dentro de ciertos límites, cuando el movimiento es rotacional. Hay que tener en cuenta, sin embargo que los cambios de diámetro conllevan variaciones de área y de presión aparente de contacto.

Según Kragelskii, I.V. (1981), el efecto de la velocidad está relacionado con la tenacidad de los materiales sometidos a desgaste, ya que esa variable determina el tiempo de existencia de un enlace friccional y en consecuencia, la tasa de deformación del material. Welsh, N.C. (1965) cita una investigación publicada por Kehl y Siebel en 1939, donde se reporta una transición de desgaste severo a suave con el aumento de la velocidad, particularmente para acero de 0,64 % de carbono a bajas durezas. También refiere los resultados de Kragelskii y Svetsova, quienes observaron un fenómeno similar en acero de 0,8 % de carbono a baja dureza y lo explicaron en términos de ablandamiento térmico.

Una transición del mismo tipo, observada por Welsh, N.C. en 1957, ocurría con periodos iniciales de desgaste severo más cortos, a velocidades mayores y se sugirió un proceso autoinducido de temple evidenciado por las altas durezas medidas en la huella. Otra posible explicación propuesta por Lipson, Ch. (1967), es que la transición debida a la velocidad sería consecuencia de un gradiente de temperatura cada vez más pronunciado y a que el área efectiva de contacto podría verse reducida, de manera que habría menos tiempo disponible para la fluencia de las asperezas.

Posteriormente en 1965, Welsh, N.C (1965) reportó la existencia de las cargas de transición, las cuales tienden a disminuir con los aumentos de velocidad. Por lo que respecta a la primera (T1), su disminución se debería al menor tiempo disponible para la regeneración de los óxidos superficiales. El decremento de T2 sería consecuencia de menores temperaturas que las necesarias para las transformaciones de fase; causa principal del cambio de desgaste severo a

suave. En ese trabajo, también se reportan la existencia de transiciones de velocidad equivalentes a las transiciones de carga mencionadas.

En otro trabajo (Hirst, W. 1957-1958), en el cual se experimentó con latón al plomo 60-40 deslizando contra acero endurecido, se observó desgaste suave a velocidades y cargas bajas, y esto se explicó por el largo tiempo disponible para la regeneración de la capa de óxidos. Asimismo, se observó que a temperaturas altas producidas externamente o por el mismo proceso de fricción, el desgaste también era del tipo suave a velocidades y cargas altas. Además, si la temperatura era aumentada suficientemente por medios externos, el desgaste severo no se presentaba. Estos dos últimos hechos concuerdan con las conclusiones de Welsh, en el sentido de atribuir la transición T3 a una transformación de fase extensiva, producida por el calor friccional y la transición T2, a una combinación del efecto de la oxidación con transformaciones de fase localizadas.

## **2.9. Otros factores**

### **2.9.1. Dureza**

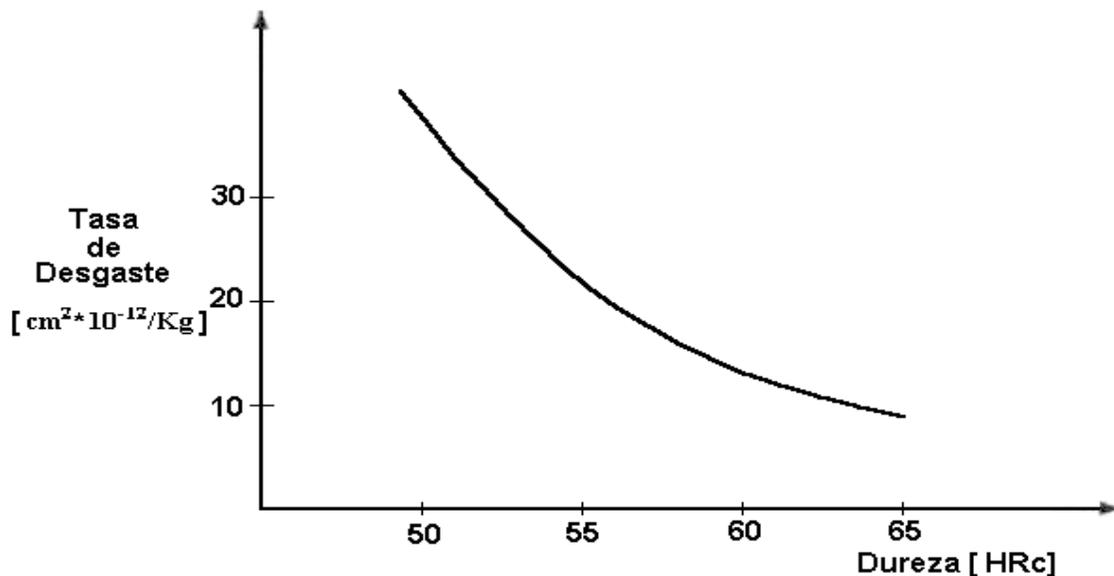
Una de las propiedades mecánicas de más fácil medición es la dureza. Dada la facilidad de su cuantificación, ha sido deseable encontrar una correlación entre esta propiedad y la resistencia al desgaste de los materiales. Sin embargo, una serie de resultados, aparentemente contradictorios, se han presentado a lo largo de años de investigación y hoy esta ampliamente reconocido que la dureza no es el único factor a controlar para determinar el comportamiento al desgaste. En primer lugar, se tiene conocimiento que normalmente los materiales duros se desgastan menos que los materiales blandos (Tabor, D. 1977).

Según el Comité para Resistencia al Desgaste de la “American Society for Metals” de 1961, la dureza es el factor más importante en el desgaste abrasivo. Por otra parte, la ecuación propuesta por la teoría de Archard predice que el desgaste es inversamente proporcional a la dureza, mientras el régimen de desgaste no cambie. A este respecto, Hirst, W. (1957-1958) presenta evidencias experimentales que indican que la Tasa de Desgaste decreció más rápidamente que el

inverso de la dureza, para 24 materiales diferentes en contacto con acero de herramienta endurecido.

Posteriormente, Kasak, A. y Neumeyer, T.A. en 1969 presentaron evidencias de que se obtuvo una reducción sustancial de la Tasa de desgaste mediante un incremento en la dureza relativamente grande; mientras que diferencias de uno o dos números de dureza HRC, no parecían tener consecuencias apreciables en la Tasa de desgaste (Fig. 2.16)

Era de esperarse que tales resultados, como lo apuntan Kragelskii y Marchenko (1981), fueran responsables de la creencia extendida durante años, de que el desgaste puede ser principalmente controlado por incrementos de dureza. En el trabajo citado previamente (Hirst, W. 1957-1958) y a pesar de la buena correlación encontrada, Hirst solo sugiere que la dureza es “probablemente una propiedad importante” que influencia las tasas de desgaste y que aunque está generalmente aceptado que el desgaste disminuye con la dureza, se conocen muchas excepciones.



**Fig. 2.16: Influencia de la dureza en la tasa de desgaste de acero con 1.0% C, 2.0% Si, 4.0% Cr, 2.5% Mo, 1.0% V y 0.3% W, estudiado por Kasak y Neumeyer**

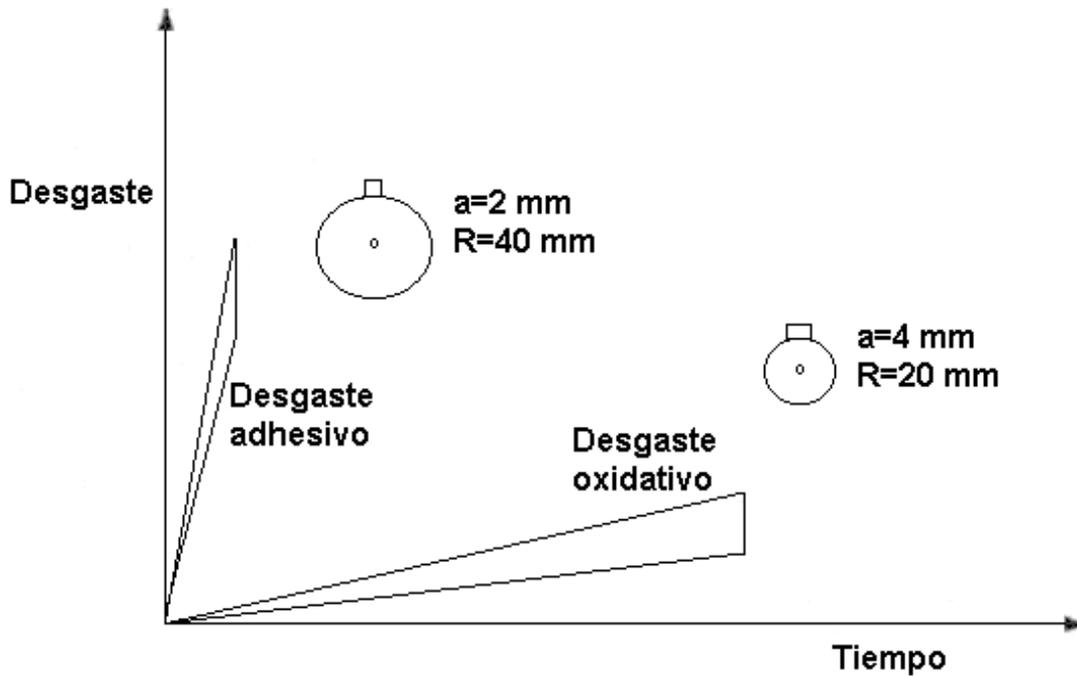
Por ejemplo, Oberle, T.L. ya en 1952, consideraba que la dureza había sido sobrestimada en la prevención del desgaste. Más recientemente, Schumacher, W. (1978) concluye que la dureza inicial de un material es un pobre criterio, en relación con su resistencia al desgaste; mientras que Ruff, A.W. et al (1981) subrayan que relaciones entre tasas de desgaste no se explican solamente por relaciones entre durezas. Lipson, Ch. (1967), por otra parte afirma, que es generalmente conocido que las tasas de desgaste disminuyen con los aumentos de dureza, siempre que otros factores permanezcan constantes.

Además reseña trabajos en los cuales se observó, que los aumentos de dureza debidos a elementos aleantes y a tratamientos térmicos, mejoran la resistencia al desgaste; mientras que el endurecimiento por deformación no tiene influencia sobre la misma.

### **2.9.2. Area aparente de contacto**

Esta variable ejerce un efecto importante sobre el tema en estudio (Tasa de Desgaste). Experimentos realizados por Archard, J.F. (1953) y posteriormente por otros investigadores (Hirst, W. 1957-1958) demostraron que la tasa de desgaste, en términos del volumen desgastado por unidad de tiempo, es constante una vez que se estabilizan condiciones. Esta situación no era esperada en virtud de que los experimentos fueron realizados con probetas de una geometría tal que el área aparente de contacto aumentaba a lo largo del ensayo. Bajo esas circunstancias el desgaste es independiente de esta variable y por tanto de la presión (aparente).

Como contraparte se puede citar resultados que demuestran la influencia de las dimensiones relativas en el fenómeno de desgaste (De Gee, A. W. 1979). En la Fig. 2.17 se observa el gráfico de un ensayo de desgaste, de un seguidor de cobre contra un anillo rotatorio de acero SAE 1045. (Aire seco,  $F_n = 20$  N,  $v = 1$  m/s), que para presiones aparentes altas produce desgaste adhesivo (severo); mientras que a presiones aparentes bajas produce desgaste oxidativo (suave).



**Fig. 2.17: Desgaste de un seguidor de cobre contra un anillo rotatorio de acero SAE 1045. aire seco,  $F_n = 20\text{ N}$ ,  $V = 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$**

Es muy posible que la validez de la relación lineal del desgaste con la carga y su independencia del área aparente, este restringida a aquellas condiciones donde la mayoría de los contactos inter-asperezas sean de tipo plástico. En las instancias donde los contactos sean mayoritariamente elásticos la presión si pudiese ser un parámetro relevante; pudiendo ser controlada por aumentos de área o disminuciones de la carga. Esto último, desde el punto de vista de la ingeniería, es mucho más difícil, ya que se traduciría en disminución de la capacidad del sistema mecánico. El aumento de las áreas de apoyo, en contraposición, es una decisión a tomar en el proceso de diseño y de allí la importancia de esta variable.

### **2.9.3. Contenido de carbono y de otros elementos de aleación**

Según la opinión de algunos investigadores (Eyre, T. S. 1978 y Comité para la Resistencia al Desgaste de la “American Society for Metals” 1961), la resistencia al desgaste aumenta con el

contenido de carbono de los aceros. Estudios detallados de Welsh, N.C. (1965), han mostrado que al aumentar el contenido de carbono disminuye el rango de desgaste severo; es decir, aumenta la carga de transición T1 y las cargas T2 y T3 disminuyen. Este investigador (Welsh, N. C. 1957) detectó mayores aumentos de dureza por trabajo friccional, que por los tratamientos térmicos, para aceros bajos en carbono. Sin embargo, posteriormente sugería que a medida que el contenido de carbono disminuye, sería cada vez más difícil que tomaran lugar en la superficie transformaciones de fases extensivas y que en consecuencia las cargas de transición T2 y T3 aumentarían (Welsh, N. C. 1965). Respecto a otros elementos de aleación es de comentar una observación hecha en dicho trabajo, referida a l hecho de que el patrón T1, T2 y T3 no se alteró por pequeñas adiciones de cromo, molibdeno y níquel. Además existen referencias positivas sobre el efecto de los carburos sobre la resistencia al desgaste. Comentario aparte merece el efecto del cromo sobre la resistencia al desgaste, en virtud de la existencia de afirmaciones en uno y otro sentido con respecto a su efecto.

#### 2.9.4. Microestructura

La microestructura es una condición muy conveniente de modificar a objeto de mejorar las propiedades al desgaste de los aceros. En primer lugar, materiales estructuralmente heterogéneos como los aceros, al ser comparados con metales puros, por lo general han presentado menor resistencia al desgaste que lo esperado de acuerdo a sus durezas (Moore, M. A. 1981).(Fig. 2.18).

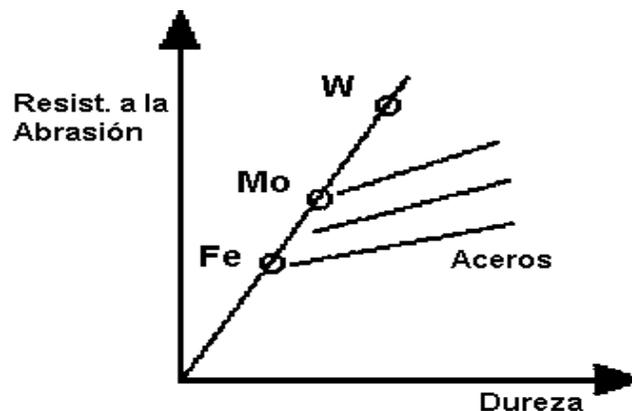


Fig. 2.18: Influencia de la dureza en la resistencia al desgaste abrasivo

Se ha determinado también, que el comportamiento al desgaste es función del tratamiento térmico y de la microestructura resultante (Moore, M. A. 1978, Jahanmir, S. 1981-1982). Por ejemplo, refinamientos de perlita han producido considerables mejoras en la resistencia al desgaste, presumiblemente debido a incrementos de la tasa de endurecimiento por deformación. (Eyre, T. S. 1978).

En otra publicación (Comité para la Resistencia al Desgaste de la “American Society for Metals” 1961) se han comparado los comportamientos de aceros con microestructura perlítica y martensítica de la misma dureza; obteniéndose un comportamiento ligeramente superior para los primeros, por debajo de 50 HRC. Este comportamiento quizás sea debido a que, como se refirió anteriormente (Moore, M. A. 1978), los últimos nombrados son poco susceptibles de endurecimiento friccional.

También se ha reportado que la austenita retenida, debido a adiciones de manganeso y níquel, disminuye la resistencia al desgaste (Comité para la Resistencia al Desgaste de la “American Society for Metals” 1961). Sin embargo, otros investigadores (Slesky, W. J 1982) sostienen que la austenita retenida mejora esta característica y encontraron mejor comportamiento para estructuras de austenita-martensita ”microduplex”, que para bainita, bainita-martensita ó 100% martensita.

Por otra parte, se ha sugerido (Boas, M. 1977) que la homogeneidad de la estructura es deseable y que lo óptimo es la distribución de partículas duras, tales como carburos, en una matriz con un coeficiente de endurecimiento por deformación relativamente alto.

La contradicción en torno a la influencia de la austenita retenida puede deberse a lo siguiente: para pequeñas cantidades de esta fase, se produciría el efecto beneficioso de las partículas duras en matriz dúctil; mientras que para cantidades altas de aquella, el efecto de las partículas pasa a un segundo plano y la matriz blanda se desgasta muy rápidamente.

Esto sería consistente con la baja resistencia al desgaste de los aceros austeníticos (Ruzzante, J. 1985).

### **2.9.5. Efectos ambientales**

Otras influencias importantes en los procesos de desgaste se deben a efectos ambientales. Es obvio que los cambios de temperatura afectan tanto las propiedades de los materiales en contacto, como las interacciones químicas entre sus superficies. También la humedad relativa tiene un efecto significativo sobre estas últimas. Según Bentley y Duquette (1981), generalmente la fricción y el desgaste aumentan con la temperatura, como resultado de aumentos de ductilidad de las asperezas y del crecimiento resultante de las juntas metálicas. Sin embargo, se han encontrado temperaturas de transición, por encima de las cuales se producen notables reducciones de la fricción y el desgaste. En general este fenómeno se ha asociado a la formación, por encima de esas temperaturas, de óxidos con muy buenas propiedades lubricantes. Con respecto a la humedad, los mismos autores reseñan resultados contradictorios. Por ejemplo, en un caso se encontró que la tasa de desgaste era máxima, con humedades relativas de entre 30 y 50%, para fricción oscilatoria de dos aceros al carbono. En un ensayo del mismo tipo, por el contrario, se presentó un mínimo de la Tasa de Desgaste para el 45% de humedad relativa. Lipson, Ch. (1967), por su parte, cita trabajos donde se determinó que en atmósferas secas la tasa de desgaste se incrementó ocho veces, con respecto a ensayos en aire húmedo. A este respecto, los resultados de Welsh, N. C. (1965) hacen pensar que en atmósferas inertes, inclusive a bajas cargas, no se presenta el desgaste suave por la imposibilidad del proceso de oxidación. En tales atmósferas, aun cuando se detectó la transición T1, ésta ocurrió a cargas mucho más bajas que en condiciones ambientales normales y se encontraron evidencias de alguna oxidación en las superficies. Esto último sería la explicación de la existencia de esa transición. Es de interés la consideración que hacen Bentley y Duquette (1981) en el sentido que la oxidación puede tener efectos opuestos. Por una parte, la oxidación promueve el desprendimiento de átomos metálicos, lo cual implica desgaste. Desde otro punto de vista, las películas de óxidos superficiales actúan como lubricantes, inhibiendo el proceso de fricción y desgaste.

### **2.9.6. Rugosidad de las superficies en contacto**

Otra variable de importancia, acerca de la cual ha existido cierta controversia, es la rugosidad de las superficies en contacto.

Oberle (1951) refiere trabajos donde se demuestra que superficies muy lisas promueven el desgaste. Sin embargo, también cita una investigación, en la cual se observó que tales superficies resisten mejor el desgaste que las superficies rugosas.

En un trabajo más reciente, Begelinger y De Gee (1977) observó que la tasa específica de desgaste aumentó linealmente con la rugosidad superficial de la contracara.

Lipson (1967) resume los efectos de la rugosidad proponiendo que el aumento de esta hace aumentar las tasas de desgaste, pero que las superficies muy lisas ven restringida su capacidad de detener contaminantes, los cuales pudieran tener efectos lubricantes. En estas condiciones se favorecerían las interacciones moleculares fuertes y en consecuencia el desgaste adhesivo.

Las teorías oxidativas y de adhesión propuestas en el pasado para explicar el desgaste a alta velocidad de los metales son rechazadas por ser incompatibles con las observaciones experimentales.

El efecto de la temperatura sobre la superficie de tracción, subsuperficie de deformación, grieta de nucleación y, grieta de propagación no puede ser descuidado y la oxidación juega un importante rol en la alta velocidad (o alta temperatura en el desgaste deslizante). El desgaste de los metales a altas temperaturas debido a altas cargas y/o velocidades es de especial interés práctico y teórico. Sin embargo el entendimiento teórico del mecanismo de desgaste en condiciones de alta velocidad y/o alta carga es bastante inadecuado.

Diversas teorías de desgaste deslizante de metales a alta velocidad han sido propuestas en el pasado.

En una teoría (Eyre, T. S. 1978) se hizo la hipótesis de que el incremento de la tasa de desgaste es debido a la pérdida de dureza con la elevación de la temperatura de acuerdo con la teoría de la adhesión (Unterweiser, P. M. 1978).

En otra teoría (Janhamir, S. 1981-1982, Czichos, H. 1978) se asumió que como resultado de la temperatura elevada la superficie oxidada (se prevé que el oxígeno este presente) y la capa de óxido es descortezada por fuerzas externas aunque se alcance un espesor crítico. En ese modelo la tasa de desgaste es determinada por la difusión de átomos de oxígeno a través de la capa de óxido.

En un tercer modelo se asume que los óxidos actúan como partículas abrasivas y así contribuye al desgaste abrasivo (Rabinowicz, E. 1981). Las limitaciones de la teoría de la adhesión discutida en papeles precedentes también se aplican para desgaste deslizante a alta velocidad.

Primeramente las partículas de desgaste son generalmente en forma de lamina, mucho más grande en tamaño que las predichas por teorías corrientes, teniendo brillo metálico.

En segundo termino a gran escala la deformación subsuperficial no puede ser explicada sobre la base de esas teorías. monótono

En tercer termino las teorías predicen que la tasa de desgaste se incrementa monótonicamente con la velocidad de deslizamiento aunque se eleve la temperatura. Esto es contrario a diversas observaciones experimentales; algunas observaciones han mostrado que la tasa de desgaste se incrementa con la velocidad. (Comité para la Resistencia al Desgaste de la “American Society for Metals” 1961). En realidad, la tasa de desgaste exhibirá un máximo y mínimo a condición de que el rango de velocidad sea suficientemente amplio.

Finalmente el efecto del coeficiente de fricción sobre la tasa de desgaste ha sido esencialmente ignorado. Unicamente la baja velocidad del desgaste deslizante, el coeficiente de fricción decrece sustancialmente con la velocidad y deberá tener un efecto pronunciado sobre la tasa de desgaste.

## **2.10. Estudios más recientes**

En décadas recientes, se han hecho numerosas investigaciones sobre el desgaste por deslizamiento, utilizando aceros con tratamientos térmicos, aleaciones, recubrimientos, etc. Entre estos trabajos que se encuentran relacionados al presente trabajo se encuentra el de Wang Y. et al (1999). El test de desgaste fue realizado en una máquina de prueba tipo bloque sobre anillo (Block on Ring). Se utilizaron como material de prueba los aceros AISI 1080 y AISI 52100. Todos los ensayos fueron reportados a la temperatura del laboratorio, sin lubricación; y con los siguientes parámetros. Rango de carga normal; 20,50,80,110,140N. Rango velocidad de deslizamiento; 0.6-1.0-1.5-2.0-2.4m/s. Distancia de deslizamiento; 600m. Se obtuvieron como resultados que para 20N y/o 0,6-1m/s el valor de la tasa de desgaste específica no pasa de 2E-

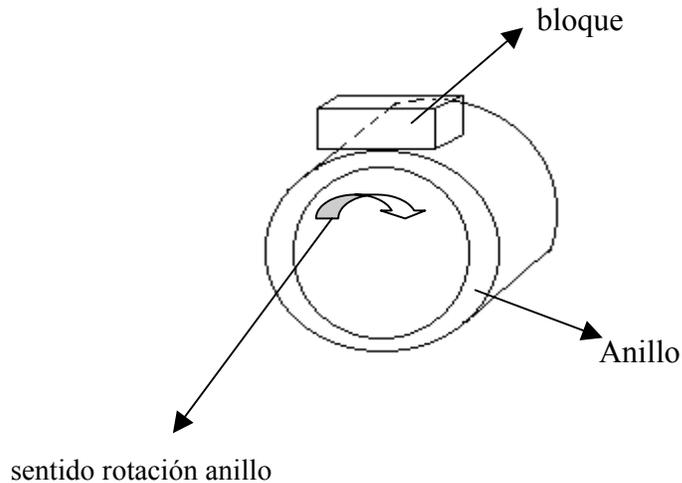
$08\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{mm})$ . Sin embargo la tasa de desgaste se incrementa rápidamente con el incremento en la carga y la velocidad más allá de una cierta carga o velocidad de la prueba. Obviamente el mecanismo de desgaste del acero 52100 tiene una transición del desgaste suave al desgaste severo. Con cargas y velocidades aún más grandes la tasa de desgaste no se incrementa más allá significativamente, descendiendo antes del máximo valor en 110N cuando la velocidad de deslizamiento se acerca a los 2.4m/s. La razón es debida a otro mecanismo de transición (desde desgaste severo a desgaste de fundición). Adicionalmente en el presente estudio se hizo un análisis de las muestras mediante las micrografías electrónicas (MEB) y análisis ferrográfico de las superficies desgastadas de los bloques. Los resultados demostraron que existen tres mecanismos de desgaste que predominaron: desgaste suave caracterizado por oxidación, desgaste severo caracterizado por adhesión y delaminación, desgaste por fusión que aparece cuando se incrementa sucesivamente la carga normal y/o la velocidad. También se comprobó que bajo las mismas condiciones el bloque (espécimen) de los aceros AISI 52100 y AISI 1080 con diferente microestructura no muestra mayor efecto sobre la ley general de los mecanismos de desgaste, es decir, que los mecanismos de transición de desgaste dependen principalmente de las condiciones de los ensayos, por lo que para un material dado la ley general de la transición del mecanismo de desgaste es similar y la carga o velocidad crítica (carga o velocidad de transición) para la transición de la tasa de desgaste puede ser cambiada por cambios microestructurales. Sin embargo, las condiciones de las pruebas son más importantes que los cambios microestructurales. Con el cálculo básico de la velocidad de desgaste y analizando la morfología de las superficies desgastadas y las partículas del desgaste, sugirieron un criterio, por el cual fácilmente se pueden identificar la transición de desgaste suave a severo. En la región de desgaste suave no hubo diferencias obvias en el volumen desgastado para varias microestructuras. Sin embargo, en el régimen de desgaste severo se observó una notable diferencia en el volumen desgastado. La resistencia al desgaste es diferente para cada microestructura y depende de la estabilidad térmica, de la resistencia a la deformación plástica y la resistencia a la iniciación y propagación de microgrietas.

Hwang, H et al (1999), investigó sobre la validez de la teoría de la adhesión, desde el punto de vista de la interacción mecánica, para describir la de la fricción en los metales. Específicamente, su trabajo experimental fue conducido a investigar la importancia de la compatibilidad de los

materiales en desgaste y su dureza sobre la fricción y el desgaste deslizante sin lubricación. Los resultados experimentales, demostraron que la compatibilidad de los materiales no tenía una significativa correlación con el coeficiente de fricción inicial y que materiales con diferente dureza desgastándose entre sí manifestaban altos coeficientes de fricción inicial. Por último, concluyeron que para los materiales utilizados, luego de analizar sus propiedades, existía una alta correlación entre el coeficiente de fricción inicial con el módulo de rigidez al corte, mientras que el coeficiente de fricción en estado estable tenía una alta relación con la dureza.

**CAPITULO III**  
**METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

La metodología experimental utilizada para la realización de este trabajo se encuentra establecida en la norma ASTM- D-2714-88, para ensayos de desgaste utilizando la configuración bloque sobre anillo (“Block-on-Ring”), la cual adaptada a este trabajo quedó como se describe a continuación.



**Fig 3.1: configuración bloque sobre anillo**

### 3.1 Selección de Materiales

Para la fabricación de los bloques se utiliza el acero AISI 4340 que tiene gran aplicación en la industria en cuanto a la elaboración de piezas mecánicas sometidas a desgaste.

**Tabla 3.1. Composición química del acero AISI 4340**

AISI 4340. Acero aleado al cromo-níquel-molibdeno.

| Designación | %<br>C | %<br>Cr | %<br>Ni | %<br>Mn | %<br>Si | %<br>Mo | Densidad<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Dureza<br>HB |
|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------------------------------|--------------|
| AISI 4340   | 0.35   | 1.50    | 1.50    | 0.70    | 0.30    | 0.20    | 7.65                              | 320          |

#### 3.1.1. Características del acero AISI 4340

Acero de alta templabilidad, de gran resistencia a la fatiga, abrasión y buena tenacidad; mantiene sus características en medios de temperaturas altas. Ciertas propiedades de templabilidad al aire, alta resistencia a la fragilidad por revenido. Esto según características suministradas por el fabricante (SAESA S.A.).

### 3.1.2. Usos y aplicaciones

Acero al cromo níquel para trabajos de máxima responsabilidad, muy tenaz y de elevada resistencia a la tracción y la torsión. Partes para máquinas, rotores de turbinas, ejes de transmisión para todo tipo de motores, ejes de tractores y maquinarias, piezas de máquinas sujetas a grandes esfuerzos, cigüeñales, puntas de eje, ruedas dentadas, pernos, levas, cardanes, crucetas, acoples, husillos, palancas, tornillos, sujetadores, porta-herramientas, arboles de engranaje, etc.

### 3.1.3. Características Físicas

Suministro, bonificado (260-320 HB Dureza Brinell) 85-110 Kgs/mm<sup>2</sup>.

### 3.1.4. Características del acero AISI D-2

Para la fabricación de los anillos se toma como referencia el acero aleado especial AISI D-2 de gran tenacidad para máxima resistencia al desgaste y a la abrasión. Esto según características suministradas por el fabricante (SAESA S.A.).

**Tabla 3.2. Composición química del acero AISI D-2**

| Designación | %<br>C | %<br>Cr | %<br>Mn | %<br>Si | %<br>Mo | %<br>V | Densidad<br>(gr/cm <sup>3</sup> ) | Dureza<br>HB |
|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|-----------------------------------|--------------|
| AISI D-2    | 1.50   | 12.00   | 0.30    | 0.30    | 0.80    | 0.85   | 7.65                              | 240          |

### 3.1.5 Usos y aplicaciones

Acero de gran tenacidad para máxima resistencia al desgaste y a la abrasión. Matrices para troquelar, estampar, repujar, laminar. Calibres de roscas de anillo y tampón, hileras para trefilar en frío, matrices, rodillos y peines par laminar roscas. Cuchillas de cizalla para materiales ligeros como papel y madera, rodajas de rebordar y plegar, herramientas para tornos de embutir chapa, fresas para madera, matrices para fabricación de cubiertos, matrices para cortar chapas de acero al silicio.

### 3.1.6 Características Físicas

Suministro. (200-240 HB) Recocido blando

### 3.2 Mecanizado de las piezas

En el proceso de mecanizado de las piezas para la realización de los ensayos de desgaste, se utilizan diversos procesos, según los recursos disponibles tanto del Taller de Máquinas-Herramientas de la Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM), así como del laboratorio del Centro de Investigaciones Tecnológicas y Aleaciones del Aluminio (CITALA) y, el laboratorio de Nuevos Materiales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales (EIMCM), todos pertenecientes a la Universidad Central de Venezuela. Adicionalmente con recursos propios se mecaniza otro lote de piezas en el Taller de Máquinas-Herramientas de la Universidad Politécnica Luis Caballero Mejías, específicamente 30 anillos de material AISI D-2.

El mecanizado de los bloques se hace a partir de un tocho (tubo macizo) circular, con dimensiones 35mm de diámetro y 300mm de largo. Para ello, se realiza un número de cortes iguales, a lo largo del eje longitudinal perpendicularmente, con la sierra mecánica. Posteriormente cada trozo obtenido es montado en el torno para obtener una de las aristas del bloque, es decir 6.70mm. A continuación a cada uno de los trozos, se les hace un corte por la mitad del diámetro, mediante máquina con disco abrasivo de carburo de silicio y así obtener dos trozos. Con el fin de asegurar la perpendicularidad entre aristas, se toma uno de los trozos del par anteriormente obtenido y, mediante fresado se obtienen dos caras paralelas. Posteriormente teniendo como referencia esas dos caras paralelas, se consiguen las medidas restantes montando todo el lote en la rectificadora, es decir, 15.84mm y 11.2mm. Por último con las medidas anteriores mediante lijado manual (lijas 120, 180, 240, 360, 400, 600 y 800) se obtiene el rectificado de acondicionamiento final para cada uno de los bloques. Las medidas obtenidas fueron 6.35mm por 15.76mm por 10.2mm, contempladas en la Norma D-2714-88. Por este procedimiento se obtienen 60 piezas a ser ensayadas.

Para el mecanizado de los anillos, un lote de 30 de ellos, se realiza mediante torno numérico, en el Taller de Máquinas-Herramientas de la Universidad Politécnica Luis Caballero Mejías. Otro lote de 40 piezas es mecanizado mediante torno manual en el Taller de Máquinas-Herramientas

de la E.I.M. En el primer lote se utiliza una barra (tubo macizo) circular de 38.1mm de diámetro por 600mm de largo. Posteriormente para el segundo lote se utiliza una barra circular de 38.1mm de diámetro por 400mm de largo. El procedimiento de mecanizado para el segundo lote se realiza en serie, es decir, se monta la barra completa en el torno, una vez montada en el torno, se perfora sucesivamente mediante 3 brocas con diámetros de 12.7mm, 16mm y 22mm, hasta una longitud de 80 mm, con velocidades de 696, 504 y 288 r.p.m. respectivamente. Después se realiza un cilindrado hasta un diámetro de 35mm y 120mm de longitud, con una velocidad de 596r.p.m. Luego se inclina el soporte orientable del carro transversal hasta un ángulo de  $\cong 16.00^\circ$  y se hace el cono interno, para después hacer el refrentado de la otra cara de los anillos y luego cortar en cilindros de 8.80mm. de espesor. Por este procedimiento se obtiene un total de 40 anillos. Adicionalmente, mediante una pieza especial en el torno, se realiza el acondicionamiento de rectificado exterior final sobre cada anillo, con lijas 120, 180, 240, 360, 400, 600 y 800. Véase en los anexos H, planos de las piezas.

### **3.3. Procedimiento para los ensayos de desgaste**

#### **3.3.1 Limpieza de las piezas**

Para proteger del oxido las piezas a ser ensayadas, luego del acondicionamiento o rectificado con las series de lijas, se procede a sumergirlas en un aceite ligero identificado como aceite marca Puro Lub 68, viscosidad a 40°C, 67.66 centistoke; para posteriormente dejarlas en remojo con acetona o con tinner por 24 horas de anticipación al momento de ser montadas en la máquina de ensayo. Esto se hace con la finalidad de remover todo el aceite, primero con el tinner y luego se pasan por alcohol absoluto al 90%, el tiempo suficiente para no quedar restos del aceite protector y al mismo tiempo asegurarse, que tanto los bloques como los anillos estén exentos de cualquier sustancia contaminante y lubricante.

A continuación se secan con secador manual, para posteriormente ser guardadas adecuadamente en bolsas plásticas identificadas y numeradas, junto al papel parafinado, para proceder al pesaje con balanza electrónica digital marca Ainsworth AA-160 con 0.01mg de precisión.

Según la cantidad de piezas a ensayar, son nuevamente almacenadas en un desecador para protegerlas de los cambios de presión atmosférica y/o cambios de temperatura o humedad del medio ambiente y así evitar la oxidación. Este proceso de limpieza esta especificado en la norma ASTM D2714-88 de calibración y operación de la máquina para el estudio de fricción y desgaste.

Una vez finalizado el proceso anterior se procede a la limpieza de la cámara de ensayo (J), identificada en la Fig. 3.2, procediendo después a la calibración de la máquina para una carga determinada.

### 3.3.2. Descripción del equipo

Los ensayos se realizan en un tribómetro para simulación de desgaste, en la configuración bloque sobre anillo o “block-on-ring”. La interacción bloque-anillo se lleva a cabo en ausencia de lubricante, en aire. A continuación se indica el procedimiento para la Calibración de la Máquina Falex alfa LFW-1, máquina de ensayo para fricción y desgaste, como se ve esquematizada en la Fig. 3.2

Componentes de la máquina de ensayo:

- (A) Interruptor.
- (B) Contador mecánico de tiempo de funcionamiento (horas).
- (C) Selector de velocidad de rotación del eje.
- (D) Contador digital de ciclos.
- (E) Controlador e indicador de la temperatura del baño de aceite.
- (F) Indicador digital de las r.p.m.
- (G) Indicador digital de la temperatura (°C).
- (H) Interruptor automático de la fuerza de roce.
- (I) Indicador digital de la fuerza de roce (libras).
- (J) Cámara de ensayo.
- (K) Dial indicador de la penetración (pulgadas\*10<sup>-4</sup>).
- (L) Cavidad para el alojamiento de los bloques.
- (M) Eje cónico para el alojamiento del anillo.
- (N) Soporte para alojar las pesas.
- (O) Brazo palanca.
- (P) Llave de drenaje para la limpieza de la cámara.

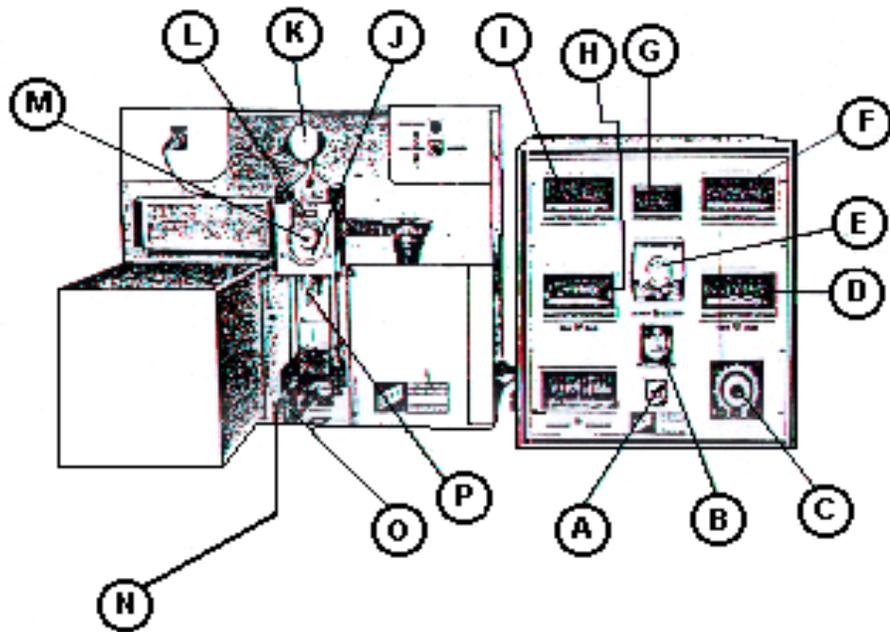


Fig. 3.2: Esquema de la máquina Falex alfa LFW-1, máquina de ensayo para fricción y desgaste

Calibración del medidor de fuerza de roce:

- 1) Accionar el interruptor(A). Espere durante 15 minutos para estabilización del instrumento.
- 2) Una vez hecho esto, quite la tapa plástica del indicador digital de la fuerza de roce(I). Ajuste el cero con el tornillo de la derecha de los tres de la esquina inferior derecha. Accione el interruptor 7 hacia la derecha y debe aparecer el número de calibración eléctrica indicado en la parte interior de la tapa. Si no es así, ajuste el tornillo central (ganancia) de los tres colocados en la esquina inferior derecha del medidor. El tornillo de la derecha es el cero(el instrumento mide 1 vez/seg.). Deje el interruptor 7 hacia la izquierda, ajuste el cero y vuelva a ajustar el número de calibración.
- 3) Coloque el porta- pesa de calibración y compense a "CERO" su efecto (-0,3lbf). Coloque pesas en el soporte y ajuste el tornillo central de ganancia para la lectura correcta.
- 4) Retire el porta-pesas de calibración, ajuste el instrumento a "CERO" y accione el interruptor numero 7 para obtener una lectura de calibración en el instrumento que pueda diferir del

numero de calibración inicial de fábrica, debido a cualquier cambio en el sistema de fricción. Anote el nuevo número de calibración. Accione el interruptor número 7 en cualquier momento para controlar la calibración eléctrica del instrumento(o sea el nuevo número de calibración).

- 5) Instale el anillo en el eje cónico de la máquina(M) con la arandela de seguridad y la tuerca. Apriete manualmente, de tal manera que una de las seis esquinas de la tuerca apunte hacia arriba, apretando con la arandela. (Para lograr esto: coloque el anillo cuidadosamente en el eje hasta que “CALCE”. Inserte la arandela y apriete la tuerca suavemente hasta simplemente apoyarla contra la arandela, sin ejercer “NINGUN TIPO DE PRESIÓN”. Haga girar cuidadosamente la arandela, sin tocar la tuerca ni el anillo con los dos dedos, en el sentido horario, hasta que sienta que está lo más apretado posible. Si ninguna de las esquinas de la tuerca apunta hacia arriba (90°) haga girar el eje con la llave ALLEN grande. Coloque la llave especial (Placa rectangular con agujero hexagonal y una pequeña proyección perpendicular en uno de sus vértices)en la tuerca y permita que la oreja a la derecha de la llave se apoye lateralmente en el soporte del espécimen empujándolo hacia la izquierda. Use la llave ALLEN grande y apriete en sentido antihorario hasta que el medidor de la fuerza de roce (I) indique 50 a 60 lbf.
- 6) Instale el bloque de manera que se apoye sobre el anillo (L), alcanzando su posición más posterior. El agujero para el termopar debe quedar hacia afuera con una pequeña carga en la palanca o una carga de 5 lbf (1/2Lb-pesa). Apriete ligeramente el tornillo de la derecha del soporte, para asegurar el bloque en su lugar. Quite la pesa (este peso depende de la carga a aplicar en el ensayo, se recomienda 1/3 de las pesas a aplicar).
- 7) Al tener el bloque y el anillo montados, se coloca un papel en la parte inferior de la cámara (J), que es donde van a caer los residuos del desgaste.
- 8) Ajuste el contador digital de ciclos (D) y el reostato o selector de velocidad de rotación del eje (C) a la velocidad prevista para el ensayo, manteniendo el brazo palanca(O) levantado, esto con el fin de no aplicar todavía la carga.

- 9) Se colocan las pesas en el soporte (N), teniendo en cuenta que, debido a la longitud del brazo palanca (O), éstas deben ser 1/10 de la carga que se desea aplicar al bloque.
- 10) Aplique la carga bajando cuidadosamente el brazo palanca(O), para evitar choques.
- 11) Durante el ensayo se toman lecturas de temperatura en el centro del bloque mediante el indicador digital de temperatura (G), y de fuerza de roce mediante el indicador digital de fuerza de roce (I). La lectura de penetración no se tomó, ya que el dial indicador de la penetración (K), se encontraba dañado.
- 12) En los ensayos definitivos, posterior a los ensayos previos, se tomaron lecturas tanto de temperatura como de fuerza de fricción cada 10 ciclos hasta alcanzar una distancia de 500 ciclos.
- 13) Al finalizar el ensayo, se retira el bloque y el anillo y cuidadosamente mediante una escobilla especial, se retiran restos de las partículas de desgaste en ambas piezas, para luego ser guardadas en sus respectivos envoltorios. Posteriormente son nuevamente pesadas en la balanza electrónica y finalmente depositadas en el desecador, mientras se les realiza el análisis de microscopía electrónica.

### **3.4. Parámetros del ensayo**

En principio, y como objetivo principal para la realización de este trabajo, se tomaron como rango de valores para cada una de las variables, a saber; distancia, velocidad y carga, tomando como referencia el trabajo realizado por Wang, Y. et al (1999), lo siguiente.

- a) Rango de valores para la distancia: 560, 825 y 1100m; 5000, 7500 y 10000ciclos respectivamente.
- b) Rango de valores para la velocidad: 0.1; 0.2 y 0.4m/s
- c) Rango de valores para la carga: 89, 178 y 267 N

Estos valores combinados uno a uno, es decir, para una distancia, una velocidad y para una carga, en total daban 54 ensayos a realizar. Se ejecutaron 21 ensayos con estos valores de carga, velocidad y distancia, de los cuales solo resultaron como validos 4 ensayos. La causa de que esto

resultara así, es que, para una distancia mayor a los 500 ciclos (55.977 m), para todas las combinaciones de cargas y velocidades aplicadas, en condiciones de deslizamiento sin lubricación se producía problemas de fuerte vibración, por lo que el bloque rápidamente adquiriría una geometría conforme, y el brazo palanca (O) (Fig.3.1), dejaba de aplicar la carga normal, y en consecuencia, el contacto entre el bloque y el anillo se perdía, por lo que al mismo tiempo, se producía una caída en los valores, tanto de temperatura como de fuerza de fricción. Finalmente, se tomó la decisión de hacer una reprogramación de los nuevos valores de velocidad, carga y distancia. Tomando en cuenta los primeros ensayos realizados, se decidió finalmente dejar la distancia fija en 500 ciclos (55.977 m) y tomar los siguientes valores para velocidad y carga.

- a) Cuatro valores de velocidad: 0.1; 0.2; 0.4 y 0.6 m/s
- b) Cuatro valores de carga: 44.5, 89, 133.5 y 178 N

La combinación uno a uno de los valores de velocidad, carga y distancia de 500 ciclos (55.977 m), da como resultado 32 ensayos en total a realizar, los cuales corresponden al diseño del experimento de 4 variables a 4 niveles con dos réplicas por ensayo.

- c) Atmósfera: Aire

### **3.5 Ensayos de Dureza**

Debido a que ambos materiales, tanto del bloque como de los anillos presentaban altas tasas de desgaste, se decidió hacer medidas de microdurezas en las huellas de desgaste pertenecientes al par tribológico. Se realizaron ensayos con Microdurometro y microscopio metalográfico Metalux 2 marca Leitz Wetzlar, bajo Norma A370-98, tanto al material del anillo como al bloque, obteniendo los siguientes resultados: Bloque de material acero AISI 4340 bonificado y sin tratamiento térmico: 328 HB Dureza Brinell. La dureza obtenida fue mediante ensayo de microdureza Vicker, en dos muestras de bloques, realizando un total de 13 mediciones. Anillo de material acero AISI D-2, recocido blando y sin tratamiento térmico: 291 HB Dureza Brinell. La dureza obtenida fue mediante ensayo de dureza Vicker en dos muestras de anillos, realizando un total de 13 mediciones.

### 3.6 Procedimientos de cálculo y reportes.

#### 3.6.1 Volumen de desgaste.

La obtención del volumen desgastado, **VD**, se hace aplicando la ecuación 3.1. Primeramente la masa **m** de material desgastado se obtiene por diferencia, a partir de los datos recabados experimentalmente, antes y después de cada ensayo, tanto para el bloque como para el anillo, mediante pesaje con la balanza electrónica. La densidad o peso específico  $\rho$ , viene determinada según el material, en nuestro caso bloque de material AISI 4340 y anillo de material AISI D-2.

$$VD = m / \rho \dots\dots\dots \text{ec. 3.1}$$

Donde, **m**, es la masa de material desgastado del bloque o anillo, según sea el caso en [gr];  $\rho$  es la densidad o peso específico en [gr / mm<sup>3</sup>] para el material utilizado tanto del bloque como el anillo, tomándose el valor de 7.65E-03 gr / mm<sup>3</sup> y **VD**, es el volumen desgastado del bloque o anillo, según sea el caso en [ mm<sup>3</sup>]

#### 3.6.2 Tasa de desgaste.

La tasa de desgaste, **TD**, se define como el volumen desgastado, **VD**, por unidad de distancia deslizada, **d**; por la ecuación:

$$TD = VD / d \dots\dots\dots \text{ec. 3.2}$$

Donde, **TD**, es la Tasa de Desgaste en [mm<sup>3</sup> / m], **VD** es el Volumen Desgastado en [mm<sup>3</sup>] y **d** es la distancia deslizada en [m].

El volumen desgastado, **VD**, se calcula mediante la ecuación 3.1, ya sea para el bloque o para el anillo y la distancia deslizada, **d**, es 500 ciclos o 55,977m

### 3.6.3 Coeficiente específico de desgaste.

El coeficiente específico de desgaste,  $k$ , definido por Archard, F. (1953), como la probabilidad de que en cada encuentro entre las asperezas se produzca una partícula de desgaste. Este se calcula por la siguiente ecuación:

$$k = \frac{3 * V * D}{d * F_n} \dots\dots\dots ec. 3.3$$

Donde  $\mathbf{VD}$ , es el Volumen Desgastado en [ mm<sup>3</sup> ],  $\mathbf{d}$  es la distancia deslizada en [mm],  $\mathbf{D}$  es la dureza del material más blando en [N / mm<sup>2</sup>],  $\mathbf{F_n}$  es la carga normal aplicada en [N] y  $\mathbf{k}$  es el coeficiente específico de desgaste

El volumen desgastado,  $\mathbf{VD}$ , se calcula mediante la ecuación 3.1, según sea el caso para el bloque o para el anillo. La distancia deslizada,  $\mathbf{d}$ , y la carga normal,  $\mathbf{F_n}$ , según la establecida para el ensayo a realizar ( $\mathbf{d} = 55977$  mm, y  $\mathbf{F_n} = 44.5; 89; 133.5$  y  $178$  N).  $\mathbf{D}$  es el valor de la dureza del material más blando del par tribológico, en nuestro caso la del anillo y es dada por el fabricante,  $240$  Kg / mm<sup>2</sup>, que es equivalente a  $2354.4$  N/mm<sup>2</sup>

El coeficiente específico de desgaste,  $\mathbf{k}$ , también se puede calcular en función de la tasa de desgaste,  $\mathbf{TD}$ , mediante la siguiente ecuación:

$$k = 3 * TD * D / F_n \dots\dots\dots ec. 3.4$$

Ya que, al sustituir la expresión de  $\mathbf{TD}$  de la ecuación 3.2 en la ecuación 3.3, resulta la ecuación 3.4. En esta ecuación, el coeficiente específico de desgaste,  $\mathbf{k}$ , indica como varía la tasa de desgaste  $\mathbf{TD}$ , en función de la carga normal,  $\mathbf{F_n}$ .

### 3.6.4 Coeficiente de fricción

El coeficiente de fricción  $f$ , se define como el cociente de la fuerza de fricción  $F_r$ , entre la carga normal  $F_n$ , mediante la ecuación:

$$f = F_r / F_n \dots\dots\dots ec. 3.5$$

Donde  $F_r$  se obtiene directamente por lectura de la máquina y  $F_n$  según la carga a ser aplicada (44.5; 89; 133.5 y 178 N).

### 3.6.5. Esfuerzos de Contacto (Hertzianos)

Los esfuerzos hertzianos se presentan en la vecindad del contacto entre dos objetos elásticos cuya geometría es tal que solo podrían hacer contacto en un punto, o a lo largo de una línea, si fueran perfectamente rígidos. El contacto en un punto (contacto puntual) ocurriría entre dos esferas, o entre una esfera y un plano (“Pin on disc”), y el contacto en una línea (contacto lineal) se daría entre un cilindro circular y un plano. En nuestro caso, configuración de un bloque sobre un anillo (“block on ring”), el tipo de contacto es lineal.

El contacto real entre un punto y una línea no puede existir porque cualquier fuerza pequeña entre los objetos en contacto podría ocasionar esfuerzos infinitos en un punto o en una línea de contacto.

Hertz, mediante el uso de técnicas analíticas, calculó los esfuerzos que se pueden esperar entre un número de tales objetos y publicó los resultados en 1881. Las dimensiones y el esfuerzo de las áreas de presión pueden calcularse por medio de las ecuaciones obtenidas por Hertz. En rigor, dichas ecuaciones son validas solo para materiales homogéneos dentro de los límites de elasticidad o bien de proporcionalidad, así como cuando la superficie de contacto es muy pequeña en comparación con el diámetro del cuerpo rodante y cuando la carga es puramente normal (no tangencial) a la misma (Niemann, G, 1973). Algunos de estos resultados son pertinentes a este trabajo, como es el caso de un bloque sobre un anillo.

Particularmente, para nuestro caso, los parámetros generales usados (Young, W. C. 1989) para calcular las dimensiones del contacto elástico o ancho de la deformación elástica, **b** y el máximo esfuerzo de contacto de compresión, **S<sub>C</sub>**, están dadas a continuación:

$$b = 1.6 * \sqrt{p * D * C_0} \dots\dots\dots ec.3.6$$

$$S_0 = 0.798 * \sqrt{\frac{p}{D * C_0}} \dots\dots\dots ec.3.7$$

$$C_0 = \left[ \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} \right] + \left[ \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right] \dots\dots\dots ec.3.8$$

Donde, **p**, es la fuerza o carga normal **F<sub>n</sub>** por unidad de longitud de contacto, **D**, es el diámetro del anillo, **ν<sub>1</sub>**, relación de Poisson del material del bloque, **ν<sub>2</sub>**, relación de Poisson del material del anillo, **E<sub>1</sub>**, módulo de Young del material del bloque, **E<sub>2</sub>**, módulo de Young del material del anillo.

Para la configuración utilizada en este trabajo, se tiene:

$$F_n = 44.5, 89, 133.5 \text{ y } 178 \text{ N}$$

$$\text{Longitud de contacto} = \text{ancho del bloque} = 6.35 \text{ mm}$$

$$D = 35 \text{ mm}$$

$$\nu_1 = \nu_2 = 0.3$$

$$E_1 = E_2 = 207000 \text{ MPa}$$

El esfuerzo de contacto de compresión tiene su mayor magnitud al comienzo del ensayo, es decir, cuando el área de contacto es mínima debido a que tanto el bloque como el anillo no han empezado a desgastarse. Al iniciarse el desgaste, el área de contacto aumenta y, en consecuencia,

el esfuerzo de contacto disminuye. De hecho, el contacto tenderá a ser entre dos superficies planas una vez que el desgaste haya avanzado lo suficiente. Sin embargo, la magnitud del esfuerzo de contacto según la configuración geométrica inicial, se recomienda reportarla en los trabajos con el objeto de compararla con otras investigaciones.

Los resultados de las variables más importantes se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3: Esfuerzos de contacto**

| <b>Fn [N]</b> | <b>p [N/m]</b> | <b>b [mm]</b> | <b>Sc[ MPa]</b> |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|
| 44.5          | 7008           | 0.074         | 120             |
| 89            | 14016          | 0.105         | 170             |
| 133.5         | 21024          | 0.129         | 209             |
| 178           | 28031          | 0.149         | 241             |

**CAPITULO IV**  
**PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

## 4.1. Resultados Obtenidos

### 4.1.1. Resultados Experimentales.

Los resultados obtenidos experimentalmente siguiendo la norma **ASTM- D-2714-88**, se muestran en las **Tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8**, para cada una de las combinaciones de las variables operacionales, con dos réplicas para cada una de las experiencias, donde:

**Fn**: Carga Normal Aplicada [N],

**V**: Velocidad de Deslizamiento [m/s],

**Fmed**: Fuerza de Roce promedio para cada réplica [N]

**fmed**: Coeficiente de fricción medio del ensayo,

**fmax**: Coeficiente de fricción máximo del ensayo,

**fprom**: Coeficiente de fricción promedio de todos los ensayos,

**mb antes**: masa del bloque antes del ensayo [gr.],

**mb desp**: masa del bloque después del ensayo [gr.],

**ma antes**: masa del anillo antes del ensayo [gr.],

**ma desp**: masa del anillo después del ensayo [gr.],

**T.D bloque**: Tasa de desgaste del bloque [ $\text{mm}^3/\text{m}$ ],

**T.D anillo**: Tasa de desgaste del anillo [ $\text{mm}^3/\text{m}$ ],

**T.D.E.**: Tasa de desgaste específica [ $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ ],

**Tmed**: Temperatura promedio medida en el centro del bloque para cada ensayo [ $^{\circ}\text{C}$ ].

**k**: Coeficiente Específico de Desgaste

**Tabla 4.1: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE**  
**CARGA = 44.5 N**

| Identific. | Fn   | V     | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | Tmed  | Fmed          |               |               |
|------------|------|-------|----------|---------|----------|---------|-------|---------------|---------------|---------------|
| ENSAYO     | [N]  | [m/s] | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]  | [N]           | fmed          | fmax          |
| 1A         | 44.5 | 0.1   | 7.5524   | 7.2332  | 21.9420  | 21.8714 | 34.64 | 35.5980       | 0.8000        | 0.9836        |
| 2B         | 44.5 | 0.1   | 7.4008   | 7.1897  | 21.8303  | 21.8290 | 32.16 | 36.1622       | 0.8126        | 0.9880        |
| 3A         | 44.5 | 0.2   | 7.4782   | 7.3410  | 22.3025  | 22.1513 | 42.16 | 34.0336       | 0.7665        | 0.9900        |
| 4B         | 44.5 | 0.2   | 7.6112   | 7.4578  | 22.9876  | 22.8631 | 41.88 | 33.5263       | 0.7551        | 0.8800        |
| 5A         | 44.5 | 0.4   | 7.6455   | 7.6095  | 22.8766  | 22.7054 | 34.68 | 27.4832       | 0.6190        | 0.7700        |
| 6B         | 44.5 | 0.4   | 7.4342   | 7.4013  | 21.0657  | 20.9275 | 49.30 | 29.3266       | 0.6605        | 0.8400        |
| 7A         | 44.5 | 0.6   | 7.5856   | 7.5648  | 22.4208  | 22.2807 | 47.22 | 29.1208       | 0.6559        | 0.7500        |
| 8B         | 44.5 | 0.6   | 7.5346   | 7.4995  | 22.3684  | 22.2062 | 50.42 | 30.2511       | 0.6813        | 0.7600        |
|            |      |       |          |         |          |         |       | <b>fprom=</b> | <b>0.7189</b> | <b>0.8702</b> |

**Tabla 4.2: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE**  
**CARGA = 89 N**

| Identific. | Fn  | V     | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | Tmed  | Fmed          |               |               |
|------------|-----|-------|----------|---------|----------|---------|-------|---------------|---------------|---------------|
| ENSAYO     | [N] | [m/s] | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]  | [N]           | fmed          | fmax          |
| 9A         | 89  | 0.1   | 7.5671   | 7.4237  | 22.1103  | 21.8611 | 44.86 | 72.8020       | 0.8180        | 0.9000        |
| 10B        | 89  | 0.1   | 7.5876   | 7.1756  | 22.6601  | 22.5000 | 47.16 | 73.7810       | 0.8290        | 0.9050        |
| 11A        | 89  | 0.2   | 7.5730   | 7.5028  | 22.4866  | 22.2596 | 48.88 | 69.3755       | 0.7795        | 0.9650        |
| 12B        | 89  | 0.2   | 7.6629   | 7.3969  | 22.6645  | 22.4195 | 50.64 | 70.6171       | 0.7935        | 0.9000        |
| 13A        | 89  | 0.4   | 7.5534   | 7.5080  | 22.1755  | 21.9264 | 50.16 | 54.0497       | 0.6073        | 0.7050        |
| 14B        | 89  | 0.4   | 7.5471   | 7.5083  | 22.9439  | 22.7081 | 58.26 | 53.5780       | 0.6020        | 0.7350        |
| 15A        | 89  | 0.6   | 7.5235   | 7.5134  | 22.7241  | 22.6286 | 59.58 | 45.3099       | 0.5091        | 0.6350        |
| 16B        | 89  | 0.6   | 7.5856   | 7.5755  | 22.2817  | 22.1718 | 58.23 | 46.9208       | 0.5272        | 0.6100        |
|            |     |       |          |         |          |         |       | <b>fprom=</b> | <b>0.6832</b> | <b>0.7944</b> |

**Tabla 4.3: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE  
CARGA = 133.5 N**

| Identific.    | Fn    | V     | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | Tmed  | Fmed     |               |               |
|---------------|-------|-------|----------|---------|----------|---------|-------|----------|---------------|---------------|
| ENSAYO        | [N]   | [m/s] | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]  | [N]      | fmed          | fmax          |
| 17A           | 133.5 | 0.1   | 7.6089   | 7.1469  | 22.6806  | 22.4448 | 53.16 | 103.1421 | 0.7726        | 0.8962        |
| 18B           | 133.5 | 0.1   | 7.6203   | 7.5239  | 22.4157  | 22.2209 | 51.16 | 110.5202 | 0.8279        | 0.9329        |
| 19A           | 133.5 | 0.2   | 7.5377   | 7.3681  | 22.3209  | 21.9797 | 64.84 | 99.1994  | 0.7431        | 0.9330        |
| 20B           | 133.5 | 0.2   | 7.4198   | 7.1935  | 22.7673  | 22.3032 | 58.10 | 96.4849  | 0.7227        | 0.8830        |
| 21A           | 133.5 | 0.4   | 7.3427   | 7.2870  | 22.7934  | 22.4697 | 61.20 | 78.6582  | 0.5892        | 0.7430        |
| 22B           | 133.5 | 0.4   | 7.5580   | 7.5161  | 22.5610  | 22.2577 | 67.08 | 81.8800  | 0.6133        | 0.7700        |
| 23A           | 133.5 | 0.6   | 7.4889   | 7.4823  | 22.5869  | 22.5070 | 66.78 | 77.9680  | 0.5840        | 0.6661        |
| 24B           | 133.5 | 0.6   | 7.4177   | 7.4005  | 21.8717  | 21.7644 | 68.74 | 69.0005  | 0.5169        | 0.6597        |
| <b>fprom=</b> |       |       |          |         |          |         |       |          | <b>0.6712</b> | <b>0.8105</b> |

**Tabla 4.4: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE  
CARGA = 178 N**

| Identific.    | Fn  | V     | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | Tmed  | Fmed     |               |               |
|---------------|-----|-------|----------|---------|----------|---------|-------|----------|---------------|---------------|
| ENSAYO        | [N] | [m/s] | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]  | [N]      | fmed          | fmax          |
| 25A           | 178 | 0.1   | 7.3589   | 7.0857  | 20.4794  | 20.1693 | 58.54 | 126.4334 | 0.7103        | 0.9775        |
| 26B           | 178 | 0.1   | 7.6353   | 7.3077  | 21.4396  | 21.0458 | 62.90 | 150.0896 | 0.8432        | 0.9850        |
| 27A           | 178 | 0.2   | 7.4402   | 7.2310  | 22.5755  | 22.1464 | 70.02 | 114.1959 | 0.6416        | 0.8425        |
| 28B           | 178 | 0.2   | 7.4368   | 7.2182  | 22.5838  | 22.0480 | 63.08 | 116.7858 | 0.6561        | 0.7700        |
| 29A           | 178 | 0.4   | 7.4465   | 7.4009  | 22.4907  | 22.2111 | 71.02 | 97.5056  | 0.5478        | 0.7000        |
| 30B           | 178 | 0.4   | 7.4668   | 7.4095  | 22.4120  | 22.1138 | 69.34 | 88.7864  | 0.4988        | 0.6700        |
| 31A           | 178 | 0.6   | 7.5232   | 7.5004  | 21.3633  | 21.2876 | 92.91 | 93.8696  | 0.5144        | 0.6522        |
| 32B           | 178 | 0.6   | 7.4579   | 7.4343  | 22.0234  | 21.9280 | 80.04 | 97.7517  | 0.5377        | 0.6547        |
| <b>fprom=</b> |     |       |          |         |          |         |       |          | <b>0.6187</b> | <b>0.7815</b> |

**Tabla 4.5: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE**  
**VELOCIDAD = 0.1m/s**

| Identific. | V     | Fn    | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | T med. | Fmed          |               |               |
|------------|-------|-------|----------|---------|----------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| ENSAYO     | [m/s] | [N]   | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]   | [N]           | fmed          | fmax          |
| 1A         | 0.1   | 44.5  | 7.5524   | 7.2332  | 21.9420  | 21.8714 | 34.64  | 35.5980       | 0.8000        | 0.9836        |
| 2B         | 0.1   | 44.5  | 7.4008   | 7.1897  | 21.8303  | 21.8290 | 32.16  | 36.1623       | 0.8126        | 0.9880        |
| 9A         | 0.1   | 89    | 7.5671   | 7.4237  | 22.1103  | 21.8611 | 44.86  | 72.8020       | 0.8180        | 0.9000        |
| 10B        | 0.1   | 89    | 7.5876   | 7.1756  | 22.6601  | 22.5000 | 47.16  | 73.7810       | 0.8290        | 0.9050        |
| 17A        | 0.1   | 133.5 | 7.6089   | 7.1469  | 22.6806  | 22.4448 | 53.16  | 103.1421      | 0.7726        | 0.8962        |
| 18B        | 0.1   | 133.5 | 7.6203   | 7.5239  | 22.4157  | 22.2209 | 51.16  | 110.5202      | 0.8279        | 0.9329        |
| 25A        | 0.1   | 178   | 7.3589   | 7.0857  | 20.4794  | 20.1693 | 58.54  | 126.4334      | 0.7103        | 0.9775        |
| 26B        | 0.1   | 178   | 7.6353   | 7.3077  | 21.4396  | 21.0458 | 62.90  | 150.0896      | 0.8432        | 0.9850        |
|            |       |       |          |         |          |         |        | <b>fprom=</b> | <b>0.8017</b> | <b>0.9460</b> |

**Tabla 4.6: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE**  
**VELOCIDAD = 0.2m/s**

| Identific. | V     | Fn    | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | T med. | Fmed          |               |               |
|------------|-------|-------|----------|---------|----------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| ENSAYO     | [m/s] | [N]   | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]   | [N]           | fmed          | fmax          |
| 3A         | 0.2   | 44.5  | 7.4782   | 7.3410  | 22.3025  | 22.1513 | 42.16  | 34.0336       | 0.7665        | 0.9900        |
| 4B         | 0.2   | 44.5  | 7.6112   | 7.4578  | 22.9876  | 22.8631 | 41.88  | 33.5263       | 0.7551        | 0.8800        |
| 11A        | 0.2   | 89    | 7.5730   | 7.5028  | 22.4866  | 22.2596 | 48.88  | 69.3755       | 0.7795        | 0.9650        |
| 12B        | 0.2   | 89    | 7.6629   | 7.3969  | 22.6645  | 22.4195 | 50.64  | 70.6171       | 0.7935        | 0.9000        |
| 19A        | 0.2   | 133.5 | 7.5377   | 7.3681  | 22.3209  | 21.9797 | 64.84  | 99.1994       | 0.7431        | 0.9330        |
| 20B        | 0.2   | 133.5 | 7.4198   | 7.1935  | 22.7673  | 22.3032 | 58.10  | 96.4849       | 0.7227        | 0.8830        |
| 27A        | 0.2   | 178   | 7.4402   | 7.2310  | 22.5755  | 22.1464 | 70.02  | 114.1959      | 0.6416        | 0.8425        |
| 28B        | 0.2   | 178   | 7.4368   | 7.2182  | 22.5838  | 22.0480 | 63.08  | 116.7858      | 0.6561        | 0.7700        |
|            |       |       |          |         |          |         |        | <b>fprom=</b> | <b>0.7323</b> | <b>0.8954</b> |

**Tabla 4.7: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE**  
**VELOCIDAD = 0.4m/s**

| Identific. | V     | Fn    | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | T med. | Fmed          |               |               |
|------------|-------|-------|----------|---------|----------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|
| ENSAYO     | [m/s] | [N]   | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]   | [N]           | fmed          | fmax          |
| 5A         | 0.4   | 44.5  | 7.6455   | 7.6095  | 22.8766  | 22.7054 | 34.68  | 27.4832       | 0.6190        | 0.7700        |
| 6B         | 0.4   | 44.5  | 7.4342   | 7.4013  | 21.0657  | 20.9275 | 49.30  | 29.3266       | 0.6605        | 0.8400        |
| 13A        | 0.4   | 89    | 7.5534   | 7.5080  | 22.1755  | 21.9264 | 50.16  | 54.0497       | 0.6073        | 0.7050        |
| 14B        | 0.4   | 89    | 7.5471   | 7.5083  | 22.9439  | 22.7081 | 58.26  | 53.5780       | 0.6020        | 0.7350        |
| 21A        | 0.4   | 133.5 | 7.3427   | 7.2870  | 22.7934  | 22.4697 | 61.20  | 78.6582       | 0.5892        | 0.7430        |
| 22B        | 0.4   | 133.5 | 7.5580   | 7.5161  | 22.5610  | 22.2577 | 67.08  | 81.8800       | 0.6133        | 0.7700        |
| 29A        | 0.4   | 178   | 7.4465   | 7.4009  | 22.4907  | 22.2111 | 71.02  | 97.5056       | 0.5478        | 0.7000        |
| 30B        | 0.4   | 178   | 7.4668   | 7.4095  | 22.4120  | 22.1138 | 69.34  | 88.7864       | 0.4988        | 0.6700        |
|            |       |       |          |         |          |         |        | <b>fprom=</b> | <b>0.5922</b> | <b>0.7416</b> |

**Tabla 4.8: RESULTADOS OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE**  
**VELOCIDAD = 0.6m/s**

| Identific. | V     | Fn    | mb antes | mb desp | ma antes | ma desp | T med.  | Fmed          |               |               |
|------------|-------|-------|----------|---------|----------|---------|---------|---------------|---------------|---------------|
| ENSAYO     | [m/s] | [N]   | [gr]     | [gr]    | [gr]     | [gr]    | [°C]    | [N]           | fmed          | fmax          |
| 7A         | 0.6   | 44.5  | 7.5856   | 7.5648  | 22.4208  | 22.2807 | 47.2200 | 29.1208       | 0.6559        | 0.7500        |
| 8B         | 0.6   | 44.5  | 7.5346   | 7.4995  | 22.3684  | 22.2062 | 50.4200 | 30.2511       | 0.6813        | 0.7600        |
| 15A        | 0.6   | 89    | 7.5235   | 7.5134  | 22.7241  | 22.6286 | 59.5800 | 45.3099       | 0.5091        | 0.6350        |
| 16B        | 0.6   | 89    | 7.5856   | 7.5755  | 22.2817  | 22.1718 | 58.2300 | 46.9208       | 0.5272        | 0.6100        |
| 23A        | 0.6   | 133.5 | 7.4889   | 7.4823  | 22.5869  | 22.5070 | 66.7800 | 77.6803       | 0.5840        | 0.6661        |
| 24B        | 0.6   | 133.5 | 7.4177   | 7.4005  | 21.8717  | 21.7644 | 68.7400 | 68.2219       | 0.5169        | 0.6597        |
| 31A        | 0.6   | 178   | 7.5232   | 7.5004  | 21.3633  | 21.2876 | 92.9111 | 93.8696       | 0.5144        | 0.6522        |
| 32B        | 0.6   | 178   | 7.4579   | 7.4343  | 22.0234  | 21.9280 | 80.0435 | 97.7517       | 0.5377        | 0.6547        |
|            |       |       |          |         |          |         |         | <b>fprom=</b> | <b>0.5658</b> | <b>0.6735</b> |

#### 4.1.2. Resultados Calculados

Los resultados calculados, se muestran en las Tablas 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12. para bloques y anillos respectivamente

**TABLA 4.9: RESULTADOS CALCULADOS BLOQUES  
MATERIAL AISI 4340 PARA RANGO DE CARGA**

| <b>Fn</b>  | <b>V</b>     | <b>T.D. Rep A</b>         | <b>T.D. Rep B</b>         | <b>T.Dprom</b>            | <b>k</b>         | <b>k</b>         | <b>k</b>        |
|------------|--------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| <b>[N]</b> | <b>[m/s]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>Replica A</b> | <b>Replica B</b> | <b>promedio</b> |
| 44.5       | 0.1          | 7.4255E-01                | 4.9103E-01                | 6.1679E-01                | 1.1786E-01       | 7.7938E-02       | 9.7899E-02      |
| 44.5       | 0.2          | 3.2039E-01                | 3.5822E-01                | 3.3931E-01                | 5.0854E-02       | 5.6859E-02       | 5.3856E-02      |
| 44.5       | 0.4          | 8.4068E-02                | 7.6829E-02                | 8.0449E-02                | 1.3344E-02       | 1.2195E-02       | 1.2769E-02      |
| 44.5       | 0.6          | 4.8573E-02                | 8.1966E-02                | 6.5270E-02                | 7.7096E-03       | 1.3010E-02       | 1.0360E-02      |
| 89         | 0.1          | 3.3487E-01                | 9.6211E-01                | 6.4849E-01                | 2.6576E-02       | 7.6355E-02       | 5.1466E-02      |
| 89         | 0.2          | 1.6393E-01                | 6.2117E-01                | 3.9255E-01                | 1.3010E-02       | 4.9297E-02       | 3.1154E-02      |
| 89         | 0.4          | 1.0602E-01                | 9.0607E-02                | 9.8313E-02                | 8.4139E-03       | 7.1907E-03       | 7.8023E-03      |
| 89         | 0.6          | 2.3586E-02                | 2.3586E-02                | 2.3586E-02                | 1.8718E-03       | 1.8718E-03       | 1.8718E-03      |
| 133.5      | 0.1          | 1.0789E+00                | 2.2512E-01                | 6.5200E-01                | 5.7081E-02       | 1.1910E-02       | 3.4496E-02      |
| 133.5      | 0.2          | 3.9459E-01                | 5.2649E-01                | 4.6054E-01                | 6.2630E-02       | 8.3566E-02       | 7.3098E-02      |
| 133.5      | 0.4          | 1.3007E-01                | 9.7846E-02                | 1.1396E-01                | 6.8818E-03       | 5.1768E-03       | 6.0293E-03      |
| 133.5      | 0.6          | 1.5412E-02                | 4.0166E-02                | 2.7789E-02                | 8.1544E-04       | 2.1251E-03       | 1.4703E-03      |
| 178        | 0.1          | 6.3559E-01                | 7.6194E-01                | 6.9877E-01                | 1.0088E-01       | 1.2094E-01       | 1.1091E-01      |
| 178        | 0.2          | 4.8659E-01                | 5.0844E-01                | 4.9752E-01                | 7.7233E-02       | 8.0702E-02       | 7.8967E-02      |
| 178        | 0.4          | 1.0649E-01                | 1.3381E-01                | 1.2015E-01                | 4.2255E-03       | 5.3096E-03       | 4.7676E-03      |
| 178        | 0.6          | 5.3243E-02                | 5.5111E-02                | 5.4177E-02                | 2.1127E-03       | 2.1869E-03       | 2.1498E-03      |

**TABLA 4.10: RESULTADOS CALCULADOS BLOQUES  
MATERIAL AISI 4340 PARA RANGO DE VELOCIDAD**

| <b>V</b>     | <b>Fn</b>  | <b>T.D. Rep A</b>         | <b>T.D. Rep B</b>         | <b>T.Dprom</b>            | <b>k</b>         | <b>k</b>         | <b>k</b>        |
|--------------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| <b>[m/s]</b> | <b>[N]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>Replica A</b> | <b>Replica B</b> | <b>promedio</b> |
| 0.1          | 44.5       | 7.4255E-01                | 4.9103E-01                | 6.1679E-01                | 1.1786E-01       | 7.7938E-02       | 9.7899E-02      |
| 0.1          | 89         | 3.3487E-01                | 9.6211E-01                | 6.4849E-01                | 2.6576E-02       | 7.6355E-02       | 5.1466E-02      |
| 0.1          | 133.5      | 1.0789E+00                | 2.2512E-01                | 6.5200E-01                | 5.7081E-02       | 1.1910E-02       | 3.4496E-02      |
| 0.1          | 178        | 6.3559E-01                | 7.6194E-01                | 6.9877E-01                | 1.0088E-01       | 1.2094E-01       | 1.1091E-01      |
| 0.2          | 44.5       | 3.2039E-01                | 3.5822E-01                | 3.3931E-01                | 5.0854E-02       | 5.6859E-02       | 5.3856E-02      |
| 0.2          | 89         | 1.6393E-01                | 6.2117E-01                | 3.9255E-01                | 1.3010E-02       | 4.9297E-02       | 3.1154E-02      |
| 0.2          | 133.5      | 3.9459E-01                | 5.2649E-01                | 4.6054E-01                | 6.2630E-02       | 8.3566E-02       | 7.3098E-02      |
| 0.2          | 178        | 4.8659E-01                | 5.0844E-01                | 4.9752E-01                | 7.7233E-02       | 8.0702E-02       | 7.8967E-02      |
| 0.4          | 44.5       | 8.4068E-02                | 7.6829E-02                | 8.0449E-02                | 1.3344E-02       | 1.2195E-02       | 1.2769E-02      |
| 0.4          | 89         | 1.0602E-01                | 9.0607E-02                | 9.8313E-02                | 8.4139E-03       | 7.1907E-03       | 7.8023E-03      |
| 0.4          | 133.5      | 1.3007E-01                | 9.7846E-02                | 1.1396E-01                | 6.8818E-03       | 5.1768E-03       | 6.0293E-03      |
| 0.4          | 178        | 1.0649E-01                | 1.3381E-01                | 1.2015E-01                | 4.2255E-03       | 5.3096E-03       | 4.7676E-03      |
| 0.6          | 44.5       | 4.8573E-02                | 8.1966E-02                | 6.5270E-02                | 7.7096E-03       | 1.3010E-02       | 1.0360E-02      |
| 0.6          | 89         | 2.3586E-02                | 2.3586E-02                | 2.3586E-02                | 1.8718E-03       | 1.8718E-03       | 1.8718E-03      |
| 0.6          | 133.5      | 1.5412E-02                | 4.0166E-02                | 2.7789E-02                | 8.1544E-04       | 2.1251E-03       | 1.4703E-03      |
| 0.6          | 178        | 5.3243E-02                | 5.5111E-02                | 5.4177E-02                | 2.1127E-03       | 2.1869E-03       | 2.1498E-03      |

**TABLA 4.11: RESULTADOS CALCULADOS ANILLOS  
MATERIAL AISI D-2 PARA RANGO DE CARGA**

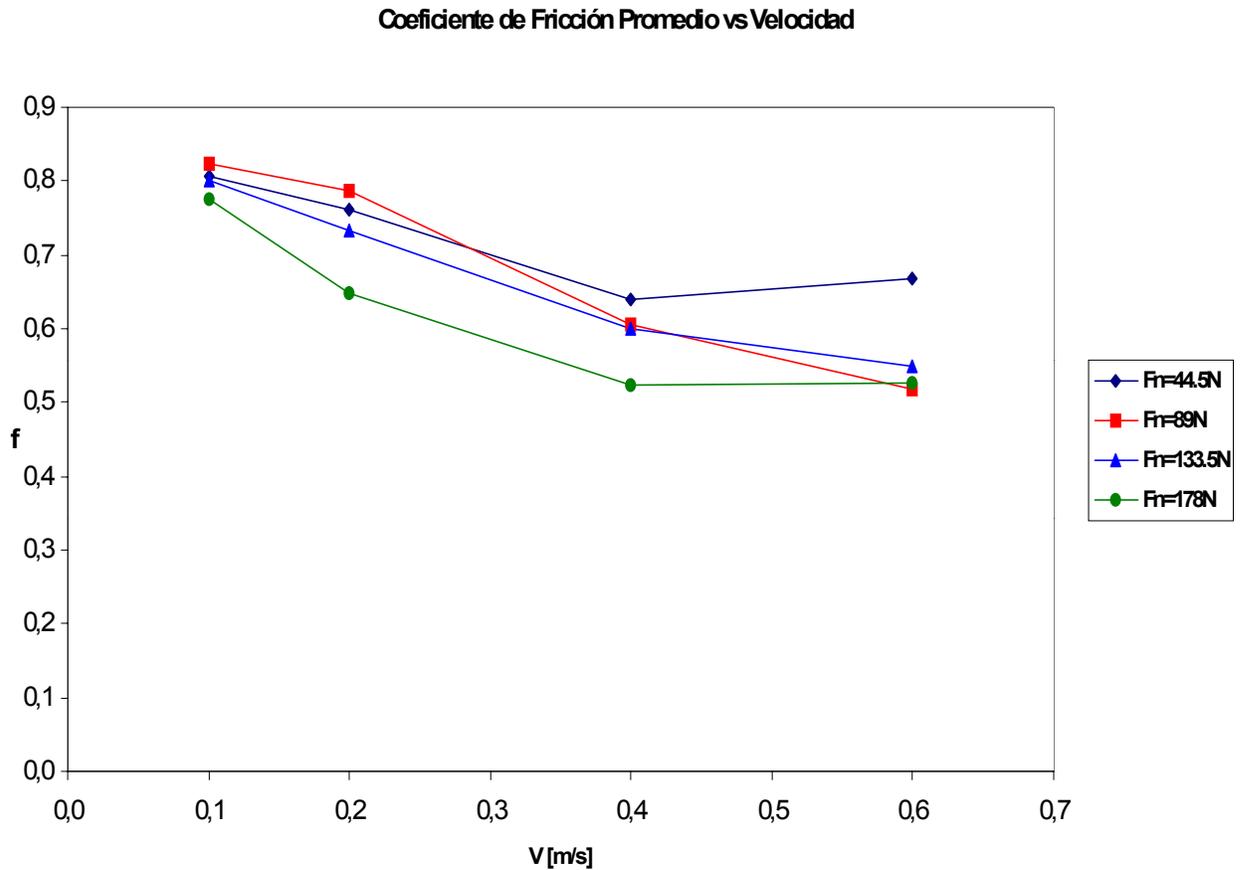
| <b>Fn</b>  | <b>V</b>     | <b>T.D.Rep A</b>          | <b>T.D.Rep B</b>          | <b>T.D.prom</b>           | <b>k</b>         | <b>k</b>         | <b>k</b>        |
|------------|--------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| <b>[N]</b> | <b>[m/s]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>Replica A</b> | <b>Replica B</b> | <b>promedio</b> |
| 44.5       | 0.1          | 1.6487E-01                | 3.0358E-03                | 8.3951E-02                | 2.6168E-02       | 4.8185E-04       | 1.3325E-02      |
| 44.5       | 0.2          | 3.5309E-01                | 2.9074E-01                | 3.2191E-01                | 5.6043E-02       | 4.6147E-02       | 5.1095E-02      |
| 44.5       | 0.4          | 3.9979E-01                | 3.2273E-01                | 3.6126E-01                | 6.3456E-02       | 5.1225E-02       | 5.7340E-02      |
| 44.5       | 0.6          | 3.2717E-01                | 3.7877E-01                | 3.5297E-01                | 5.1929E-02       | 6.0120E-02       | 5.6025E-02      |
| 89         | 0.1          | 5.8194E-01                | 3.7387E-01                | 4.7790E-01                | 4.6184E-02       | 2.9671E-02       | 3.7927E-02      |
| 89         | 0.2          | 5.3010E-01                | 5.7213E-01                | 5.5111E-01                | 4.2069E-02       | 4.5405E-02       | 4.3737E-02      |
| 89         | 0.4          | 5.8170E-01                | 5.5065E-01                | 5.6618E-01                | 4.6165E-02       | 4.3700E-02       | 4.4933E-02      |
| 89         | 0.6          | 2.2301E-01                | 2.5664E-01                | 2.3983E-01                | 1.7699E-02       | 2.0368E-02       | 1.9033E-02      |
| 133.5      | 0.1          | 5.5065E-01                | 4.5490E-01                | 5.0277E-01                | 2.9134E-02       | 2.4068E-02       | 2.6601E-02      |
| 133.5      | 0.2          | 7.9678E-01                | 1.0838E+00                | 9.4028E-01                | 4.2156E-02       | 5.7340E-02       | 4.9748E-02      |
| 133.5      | 0.4          | 7.5591E-01                | 7.0827E-01                | 7.3209E-01                | 3.9994E-02       | 3.7473E-02       | 3.8733E-02      |
| 133.5      | 0.6          | 1.8658E-01                | 2.5057E-01                | 2.1858E-01                | 9.8718E-03       | 1.3257E-02       | 1.1564E-02      |
| 178        | 0.1          | 7.2415E-01                | 9.1961E-01                | 8.2188E-01                | 2.8735E-02       | 3.6491E-02       | 3.2613E-02      |
| 178        | 0.2          | 1.0020E+00                | 1.2512E+00                | 1.1266E+00                | 3.9762E-02       | 4.9649E-02       | 4.4706E-02      |
| 178        | 0.4          | 6.5293E-01                | 6.9636E-01                | 6.7465E-01                | 2.5909E-02       | 2.7632E-02       | 2.6771E-02      |
| 178        | 0.6          | 1.7678E-01                | 2.2278E-01                | 1.9978E-01                | 7.0147E-03       | 8.8401E-03       | 7.9274E-03      |

**TABLA 4.12: RESULTADOS CALCULADOS ANILLOS  
MATERIAL AISI D-2 PARA RANGO DE VELOCIDAD**

| <b>V</b>     | <b>Fn</b>  | <b>T.D.Rep A</b>          | <b>T.D.Rep B</b>          | <b>T.D.prom</b>           | <b>k</b>         | <b>k</b>         | <b>k</b>        |
|--------------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| <b>[m/s]</b> | <b>[N]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>[mm<sup>3</sup>/m]</b> | <b>Replica A</b> | <b>Replica B</b> | <b>promedio</b> |
| 0.1          | 44.5       | 1.6487E-01                | 3.0358E-03                | 8.3951E-02                | 2.6168E-02       | 4.8185E-04       | 1.3325E-02      |
| 0.1          | 89         | 5.8194E-01                | 3.7387E-01                | 4.7790E-01                | 4.6184E-02       | 2.9671E-02       | 3.7927E-02      |
| 0.1          | 133.5      | 5.5065E-01                | 4.5490E-01                | 5.0277E-01                | 2.9134E-02       | 2.4068E-02       | 2.6601E-02      |
| 0.1          | 178        | 7.2415E-01                | 9.1961E-01                | 8.2188E-01                | 2.8735E-02       | 3.6491E-02       | 3.2613E-02      |
| 0.2          | 44.5       | 3.5309E-01                | 2.9074E-01                | 3.2191E-01                | 5.6043E-02       | 4.6147E-02       | 5.1095E-02      |
| 0.2          | 89         | 5.3010E-01                | 5.7213E-01                | 5.5111E-01                | 4.2069E-02       | 4.5405E-02       | 4.3737E-02      |
| 0.2          | 133.5      | 7.9678E-01                | 1.0838E+00                | 9.4028E-01                | 4.2156E-02       | 5.7340E-02       | 4.9748E-02      |
| 0.2          | 178        | 1.0020E+00                | 1.2512E+00                | 1.1266E+00                | 3.9762E-02       | 4.9649E-02       | 4.4706E-02      |
| 0.4          | 44.5       | 3.9979E-01                | 3.2273E-01                | 3.6126E-01                | 6.3456E-02       | 5.1225E-02       | 5.7340E-02      |
| 0.4          | 89         | 5.8170E-01                | 5.5065E-01                | 5.6618E-01                | 4.6165E-02       | 4.3700E-02       | 4.4933E-02      |
| 0.4          | 133.5      | 7.5591E-01                | 7.0827E-01                | 7.3209E-01                | 3.9994E-02       | 3.7473E-02       | 3.8733E-02      |
| 0.4          | 178        | 6.5293E-01                | 6.9636E-01                | 6.7465E-01                | 2.5909E-02       | 2.7632E-02       | 2.6771E-02      |
| 0.6          | 44.5       | 3.2717E-01                | 3.7877E-01                | 3.5297E-01                | 5.1929E-02       | 6.0120E-02       | 5.6025E-02      |
| 0.6          | 89         | 2.2301E-01                | 2.5664E-01                | 2.3983E-01                | 1.7699E-02       | 2.0368E-02       | 1.9033E-02      |
| 0.6          | 133.5      | 1.8658E-01                | 2.5057E-01                | 2.1858E-01                | 9.8718E-03       | 1.3257E-02       | 1.1564E-02      |
| 0.6          | 178        | 1.7678E-01                | 2.2278E-01                | 1.9978E-01                | 7.0147E-03       | 8.8401E-03       | 7.9274E-03      |

## 4.2 ANALISIS DE RESULTADOS

### 4.2.1 Efecto de la velocidad de deslizamiento sobre el coeficiente de fricción.



**Figura. 4.1:**Gráfica de coeficiente de fricción promedio  $f$  contra velocidad de deslizamiento  $V$

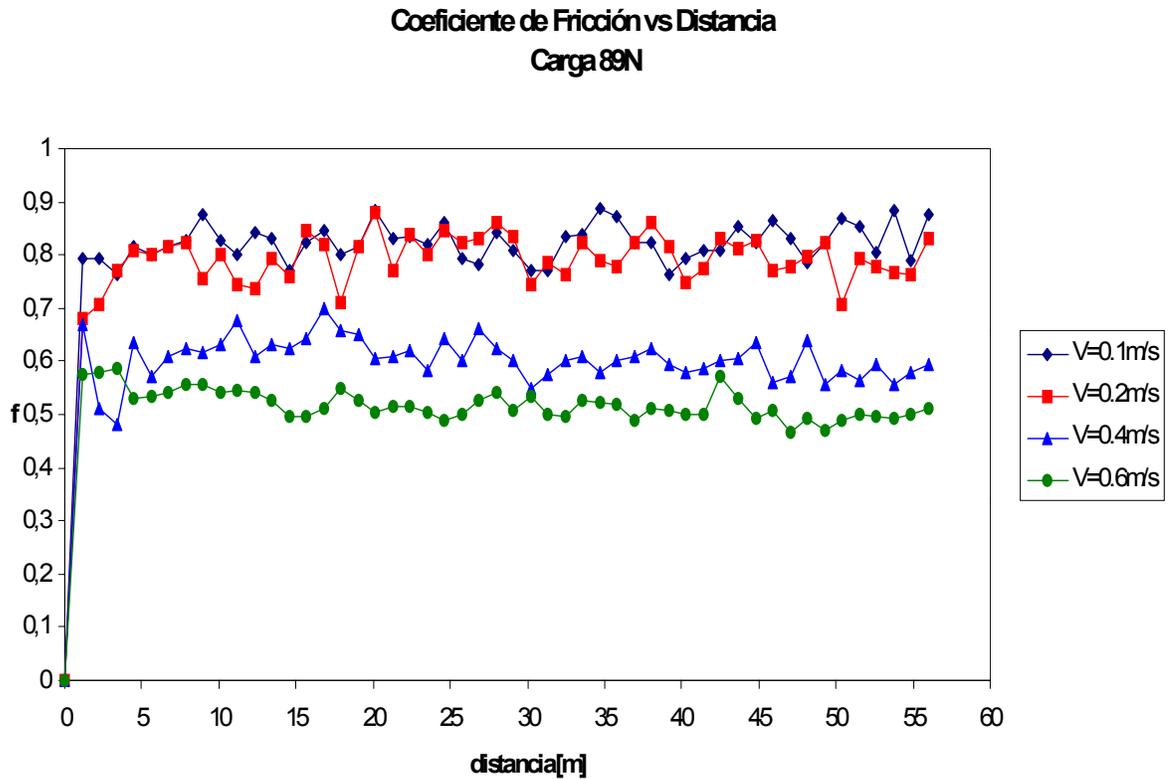
En la gráfica de la figura 4.1 se puede observar que para la carga 89N y velocidad 0.1m/s, se obtiene el valor numérico máximo, 0.8235, en el coeficiente de fricción promedio  $f$ . En general al aumentar la velocidad para todas las categorías de carga aplicada, el coeficiente de fricción  $f$  tiende a disminuir. Desde los valores de carga 89N y velocidad 0.1m/s hasta los valores más altos para todos los ensayos, tanto para carga como para velocidad, es decir, 178N y 0.6m/s, ocurre dicho comportamiento. Para estos valores se obtiene una tendencia a disminuir hasta un valor mínimo de 0.5261 en promedio para el coeficiente de fricción, sin embargo, el menor valor

en el coeficiente de fricción promedio, es para el valor de carga aplicada 89N a la misma velocidad, es decir 0.6m/s, teniendo muy poca variación en comparación al valor anterior, resultando 0.5182, que es el mínimo valor absoluto en todos los ensayos realizados. Comparando el valor máximo en el coeficiente de fricción  $f$  a la más baja velocidad y el valor mínimo a la más alta velocidad, la disminución está en un factor de 1.57, que se acerca al comportamiento de los aceros, en la que la reducción del valor es a menos de la mitad (Johnson, R.L. et al 1948). Puesto que el crecimiento del espesor de la película está limitado por el desgaste y la ruptura, cabría esperar que el coeficiente de fricción alcance un valor estable conforme se estabilice el espesor de película. La excepción en el comportamiento de los valores anteriores, lo representa la categoría de 44.5N, que es la de menor carga, desde 0.4m/s hasta 0.6m/s de velocidad de deslizamiento, en la que la tendencia es a aumentar desde 0.6397 hasta 0.6686 valores en promedio para el coeficiente de fricción respectivamente.

Adicionalmente, se observa en la gráfica que para valores de velocidad entre 0.4m/s y 0.6m/s y categoría de 178N de carga aplicada, la variación en el coeficiente de fricción  $f$  es prácticamente invariable, ya que los valores que resultan son 0.5233 y 0.5261. La tendencia en el comportamiento para las categorías de cargas intermedias, es decir, 89N y 133.5N disminuyen de forma lineal con buenos factores de correlación para los coeficientes de fricción en función de la velocidad de deslizamiento. A partir de 0.4m/s hasta 0.6m/s los valores en el coeficiente de fricción promedio para las categorías de cargas extremas, tienden a estabilizarse con un leve crecimiento, es decir, 0.6397 y 0.6686 para 44.5N; 0.5233 y 0.5261 para 178N respectivamente.

En conclusión, al aumentar la velocidad disminuye el coeficiente de fricción  $f$ , para todo el rango de valores estudiado de carga aplicada.

En la gráfica de la figura 4.2, coeficiente de fricción contra distancia de deslizamiento, se presenta los valores para categoría de 89N de carga aplicada y orden creciente de categoría de velocidad de deslizamiento. Los valores del coeficiente de fricción máximos son 0.8875, 0.8800, 0.7000 y 0.5875 en comparación al promedio alcanzado a lo largo de la distancia deslizada que son 0.8235, 0.7865, 0.6046 y 0.5181; esto indica mejor el efecto de la velocidad sobre el coeficiente de fricción y el desarrollo del mismo a lo largo de la distancia.



**Figura 4.2:** Gráfica coeficiente de fricción contra distancia deslizada para la categoría de 89N de carga aplicada

Este comportamiento se justifica por lo siguiente. El decremento de la fricción y el desgaste al elevarse la velocidad de deslizamiento, se debe a la mayor inclinación del gradiente de temperatura; y como el área efectiva de contacto puede reducirse, queda menos tiempo disponible para ceder bajo la carga aplicada (Lipson, Ch. 1967). Esto se puede observar en los valores que se obtienen para las diferentes velocidades del análisis de la gráfica de la figura 4.1, coeficiente de fricción promedio contra velocidad de deslizamiento; y como se ve más adelante en la gráfica de la figura 4.7, tasa de desgaste promedio contra velocidad de deslizamiento y la gráfica de la figura 4.9, temperatura promedio del bloque contra velocidad de deslizamiento, las cuales se corresponden con diferentes trabajos realizados anteriormente.

Por ejemplo, según Kragelskii, I.V. y Alisin, V.V. (1981), el efecto de la velocidad está relacionado con la tenacidad de los materiales sometidos a desgaste, ya que esa variable determina el tiempo de existencia de un enlace friccional y en consecuencia, la tasa de deformación del material.

La tendencia descendente del coeficiente de fricción a velocidades más altas, no se considera contraria a las leyes de la fricción, considerando que la fricción es independiente de la velocidad, sino más bien, como el resultado de la intervención de otras variables en el mecanismo.

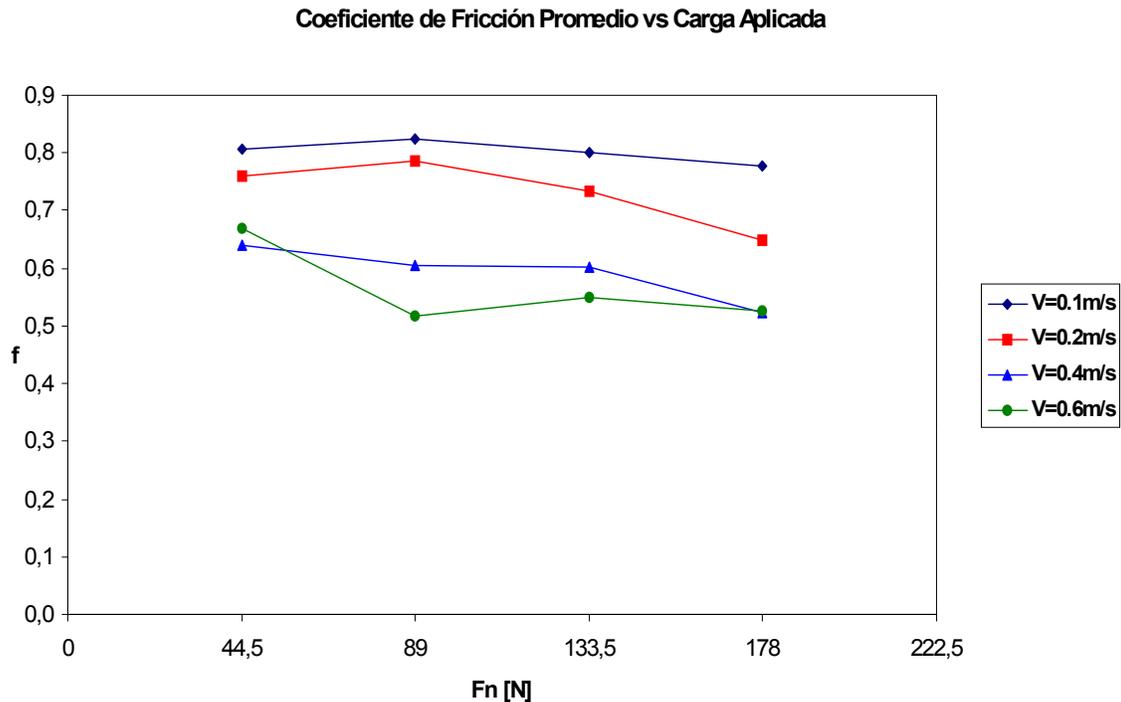
La formación de películas de óxido de hierro de espesor apreciable, se considera principalmente como una de las causas que benefician dicho comportamiento sobre el coeficiente de fricción, debido a que, a velocidades de deslizamiento más altas, la formación de películas de óxidos se acelera, por elevarse la tasa de generación de calor en las superficies deslizantes al liberarse más energía de fricción (Bisson, E.E. et al 1955).

El aumento de temperatura también reduce la ya de por sí baja resistencia al corte de la película superficial. Existen tres tipos de óxidos de hierro que son, el óxido ferroso (FeO), el óxido ferroso-férrico (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) y el óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La capa de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> forma una película de pequeños granos irregularmente orientados. De ello se deduce que los cristales de esta película pueden adaptarse muy fácilmente a las irregularidades de la superficie. Esta propiedad del material indica una mayor capacidad para soportar cargas, resultado de la tenacidad de la película. El Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> evita también el rasgado, ayudando a prevenir el contacto metal-metal y a mantener bajos los valores de fricción.

Como contraste se encuentra el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Cuando este se forma lo hace como cristales toscos y duros, con orientación preferente. El tamaño de estos cristales les impide adaptarse con facilidad a las irregularidades de la superficie. Esta película no soporta cargas.

Por último se encuentra el FeO indicado como un posible lubricante. Para su formación se requieren temperaturas muy altas, superiores a la de recocido de muchos aceros. Por lo tanto, es poco usado en aplicaciones prácticas.

#### 4.2.2 Efecto de la carga aplicada sobre el coeficiente de fricción.



**Figura. 4.3: Gráfica de Coeficiente de fricción promedio  $f$  contra carga aplicada  $F_n$**

Para categoría de velocidad de deslizamiento igual a 0.1m/s y rango de carga desde 44.5N hasta 89N, el coeficiente de fricción promedio se incrementa, como se observa en el gráfico de la figura 4.3, Coeficiente de fricción promedio contra carga aplicada. Luego desde el rango de carga 89N hasta 178N, el coeficiente de fricción disminuye con tendencia perfectamente lineal.

Para categoría de 0.2m/s el comportamiento es similar a la categoría de velocidad constante anterior, aunque la tendencia al aumentar la carga desde 89N hasta 178N es lineal con una menor exactitud de correlación y es descendente en ambos caso

Todos los valores para el coeficiente de fricción promedio manteniendo la velocidad constante e igual a 0.1m/s, son los valores obtenidos más altos para todos los ensayos. Para categoría de velocidad constante igual a 0.4m/s y rango de carga entre 89N y 133.5N el valor del coeficiente de fricción promedio se mantiene prácticamente sin variación (0.6047 y 0.6013 respectivamente). Para los rangos de variación de carga restantes, es decir, de 44.5N hasta 89N y de 133.5N hasta

178N la tendencia en la variación del coeficiente de fricción promedio es descendente. En contraste, para la categoría de 0.6m/s, que es la de mayor velocidad, el comportamiento en la tendencia en el coeficiente de fricción promedio es más variable para todo el rango de carga, ya que desciende y asciende con valores entre 0.6656, 0.5182, 0.5504 y 0.5251.

En conclusión, al aumentar la carga con excepción para la categoría de mayor velocidad, es decir 0.6m/s, tiende a disminuir el coeficiente de fricción promedio. No obstante esa disminución no es tan pronunciada, sino más bien tiende a valores de estabilización individualmente para cada una de las categorías de velocidad.

La siguiente descripción que se hace mediante la base de las teorías de delaminación (Nam P. Suh y H.C. Sin, 1980) y la teoría de la adhesión (Tabor, D. 1978) es la que mejor corresponde a la totalidad de las gráficas obtenidas para el coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento, en el presente trabajo.

La primera teoría afirma que el coeficiente de fricción  $f$  entre superficies deslizantes se debe a varios efectos combinados:

$f_d$ : componente del coeficiente de fricción producido por la deformación de las asperezas de la superficie

$f_p$ : componente del coeficiente de fricción proveniente del surcado o estriado producido por partículas de desgaste y superficie endurecida de las asperezas

$f_a$ : componente del coeficiente de fricción por la adhesión entre las superficies planas, es decir, por partículas que permanecen en la zona de desgaste

La contribución relativa de esos componentes depende de la condición de la interfase de deslizamiento, la cual a su vez depende de los materiales específicos usados, su topografía superficial y el medio ambiente. La gráfica de coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento, se encuentra subdividida en las siguientes fases:

a) Estado I, el valor del coeficiente de fricción inicial se encuentra controlado por el surcado de la superficie debido a las asperezas. La adhesión no es relevante pero sí la contaminación superficial. La deformación de las asperezas se sucede con el arranque del deslizamiento, afectando al coeficiente de fricción estático. No obstante, la deformación de las asperezas no es lo

más importante, que influye en el coeficiente de fricción, sino, la generación de nuevas asperezas, tan pronto comienza el deslizamiento. En consecuencia, el coeficiente de fricción  $f$  inicial en esta fase, es independiente de las condiciones superficiales y ambientales e independiente de la combinación o par tribológico.

b) En el estado II, el coeficiente de fricción  $f$  comienza a elevarse suavemente, aunque se incrementa la adhesión. Cuando la interfase es lubricada la fase I persiste por más tiempo y la fase II no se presenta.

La inclinación de la pendiente en la curva de coeficiente de fricción contra distancia de deslizamiento  $f$  vs  $d$  en la fase II puede ser mayor, si las partículas de desgaste formadas por deformación de las asperezas y la fractura, son atrapadas entre las superficies deslizantes y los surcos formados.

c) El estado III esta caracterizado por una mayor inclinación en la curva de coeficiente de fricción contra distancia de deslizamiento,  $f$  vs  $d$ , debido al rápido incremento en el número de partículas de desgaste atrapadas entre las superficies deslizantes, como una consecuencia de las altas tasas de desgaste. La inclinación es afectada también por el incremento de la adhesión debido al incremento en el área interfásica limpia.

La fuerza requerida para deformar las asperezas hace que aumente la fuerza friccional en esta fase cuanto más grande sea la aspereza superficial presente. Las partículas de desgaste son generadas cuando los procesos de formación de dichas partículas por deformación subsuperficial, nucleación y propagación de grietas, postuladas por la teoría de delaminación de desgaste propuesta por Suh, N.P (1973), son completos. Algunas partículas de desgaste quedan nuevamente atrapadas entre las superficies de contacto causando surcos. Este último proceso será mayor cuando las partículas de desgaste son atrapadas entre metales cuyas durezas sean aproximadamente iguales, sin embargo, al mismo tiempo penetraran dentro de ambas superficies previniendo algún deslizamiento entre ellas mismas y la superficie.

d) El estado IV, es alcanzado cuando el número de partículas de desgaste restantes atrapadas en la interfase se hacen constante. Esto ocurre cuando el número de partículas nuevamente atrapadas es igual al número de partículas sobrantes de la interfase. La contribución de la

adhesión a la fricción en esta fase se hace constante igualmente. La deformación de las asperezas sigue siendo importante, luego que el proceso de desgaste por delaminación crea nuevas superficies rugosas con asperezas. No obstante, la deformación de las asperezas en la mayoría de los casos no es más importante que el proceso de formación de surcos, luego que las asperezas se deforman fácilmente y la frecuencia de generación de nuevas asperezas es baja. Cuando el deslizamiento es entre dos metales iguales, o cuando el mecanismo responsable por el estado V, es decir, el estado siguiente, no juega un significativo rol, el coeficiente de fricción del estado IV es el coeficiente de fricción de estado estable entre los dos metales.

e) En el estado V, en algunos casos, tales como cuando la pieza que permanece en estado estacionario es de mayor dureza que la pieza que se mantiene en movimiento, las asperezas de la superficie más dura son gradualmente removidas (comienzo del estado V), creando un acabado de espejo. En ese caso la fuerza friccional decrece debido a la disminución en el proceso de formación de surcos y deformación de las asperezas, no obstante las partículas de desgaste no se pueden fijar sobre una superficie más dura pulimentada.

f) En el estado VI, cuando la superficie más dura se vuelve suavemente pulida y con mayor extensión, la superficie menos dura o más suave también adquiere el mismo acabado tipo espejo y la fuerza de fricción se mantiene a nivel constante. Las superficies nunca son completamente lisas por lo que siempre hay “orificios” debido a la creación de partículas de desgaste por delaminación. Esos cráteres proveen puntos de apoyo para las partículas de desgaste. Sin embargo, cuando la superficie más dura no se encuentra estacionaria, al moverse contra la superficie más suave, los restos rugosos probablemente no adquieren el brillo, por razones geométricas. En ese caso, tanto la fase V como la fase VI no se hacen presentes. Por ejemplo, si se consideran los datos experimentales presentados en las tablas 4.5, y 4.8, simultáneamente con las gráficas de las figuras 4.4 y 4.5, todos ellos representan la evolución del coeficiente de fricción con la distancia deslizada para su respectiva velocidad de deslizamiento constante, variando los niveles de carga aplicada. Se puede observar en la gráfica de la figura 4.4 que los máximos valores para categoría de 0.1m/s de velocidad y las diferentes categorías en orden creciente de carga aplicada son 0.9728, 0.8850, 0.9017 y 0.8975 en comparación al valor promedio a lo largo de la distancia que son 0.8063, 0.8235, 0.8002 y 0.7767 respectivamente.

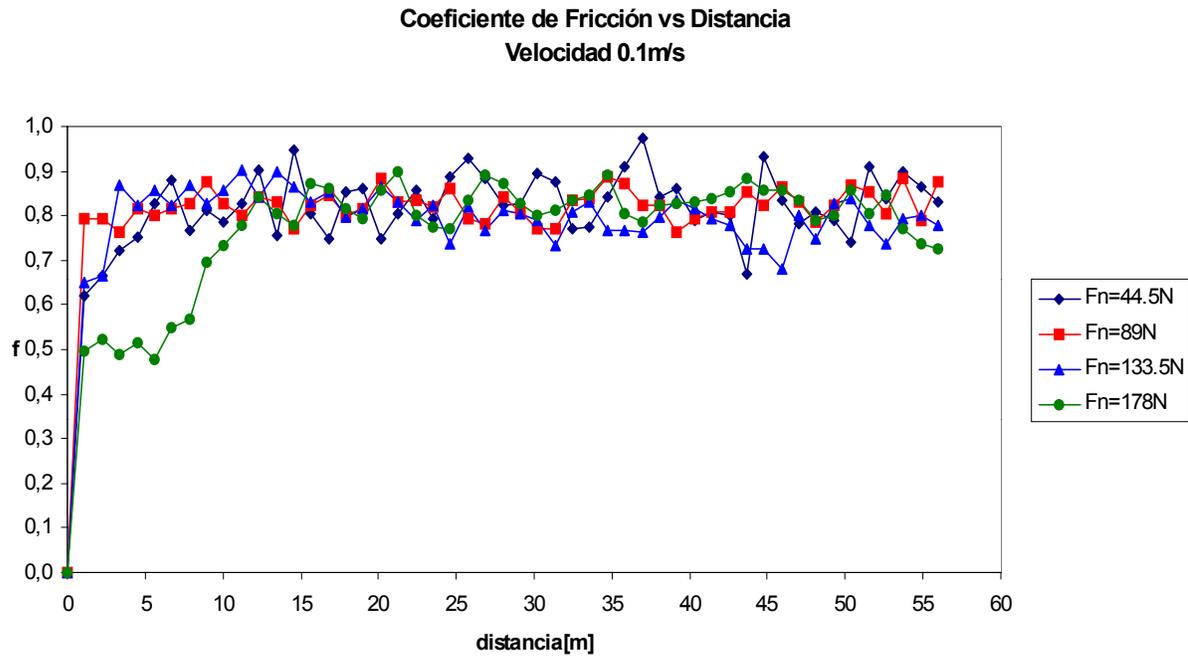


Figura 4.4: Gráfica coeficiente de fricción contra distancia deslizada para la categoría de 0.1m/s de velocidad de deslizamiento

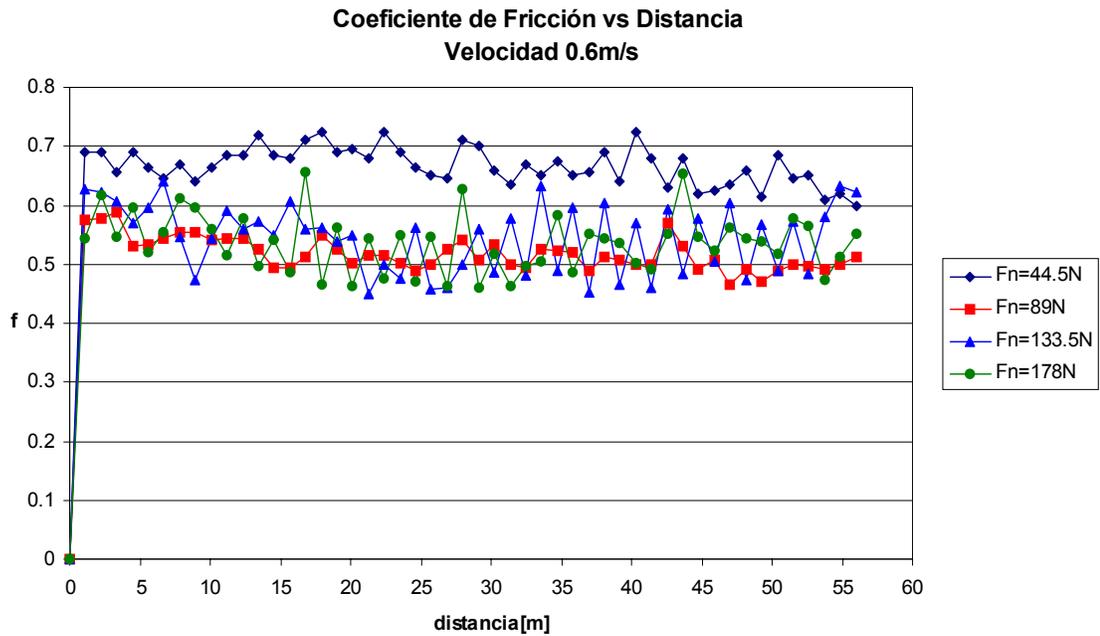


Figura 4.5: Gráfica coeficiente de fricción contra distancia deslizada para la categoría de 0.6m/s de velocidad de deslizamiento

Igualmente en la gráfica de la figura 4.5 se pueden observar los máximos valores para categoría de 0.6m/s y las diferentes categorías en orden creciente de carga aplicada que son 0.7250, 0.5875, 0.6400 y 0.6550 en comparación al valor promedio a lo largo de la distancia deslizada que son 0.6686, 0.5181, 0.5504 y 0.5260 respectivamente.

Se puede ver en las gráficas de las figuras 4.4 y 4.5 que rápidamente los valores del coeficiente de fricción alcanzan un máximo; esto es debido a que las superficies en contacto nunca son totalmente lisas si se observan a escala microscópica, sino que presentan crestas y valles. Estos picos o asperezas hacen que las superficies en contacto estén más estrechamente aproximadas de lo que podría indicar una consideración sobre los niveles superficiales medios en que se reporta la rugosidad.

Cuando dos superficies metálicas libres de lubricantes entran en contacto, tienden a adherirse entre sí, según la teoría de la adhesión (Tabor, D. 1973). Esta tendencia natural se origina por la presencia de electrones en exceso o por la carencia de electrones en los átomos de las superficies de los metales. Por lo tanto esto explica porque el coeficiente de fricción aumenta tan bruscamente al inicio de los ensayos, esto se evidencia aún más debido a que ambas superficies son del mismo material. Si se produce deslizamiento, las uniones formadas (uniones soldadas en frío) se rompen, siendo la principal causa de la fricción, la fuerza necesaria para romper esas uniones. Si adicionalmente uno de las dos superficies es más dura que la otra, las asperezas de la primera producen surcos en la segunda, considerándose la fuerza necesaria para producir estos surcos, como una segunda componente de la fricción (Tabor, D. 1978).

A continuación los valores se estabilizan alrededor del promedio para la totalidad de la distancia, actuando en ello varios factores como la formación de óxidos de hierro debido a que los ensayos se realizaron al aire, y también debido al calor generado por la fricción en las superficies deslizantes.

Según Lipson, Ch. (1952), el aumento de temperatura en la superficie también trae como consecuencia una reducción de la resistencia al corte del material, provocando la ruptura de algunas adhesiones adhesivas producidas al inicio. Igualmente se puede observar en las gráficas anteriormente mencionadas que para altas cargas, debido a que la capa de óxido se va incrementando, hasta alcanzar un espesor crítico, esto contribuye para que los valores cercanos al

promedio del coeficiente de fricción, obtenidos a lo largo de la distancia de deslizamiento, sean menores que para las categorías de cargas más baja. Por otra parte, el rápido proceso de estabilización en los valores del coeficiente de fricción se debe a la pronta llegada del comienzo del mecanismo de desgaste abrasivo, ya que antes de ocurrir este mecanismo, los súbitos incrementos del coeficiente de fricción, se explican porque las adhesiones formadas tienden a romperse debido a que las superficies siguen desplazándose entre sí bajo la acción de la carga normal y se fracturan las asperezas de las superficies.

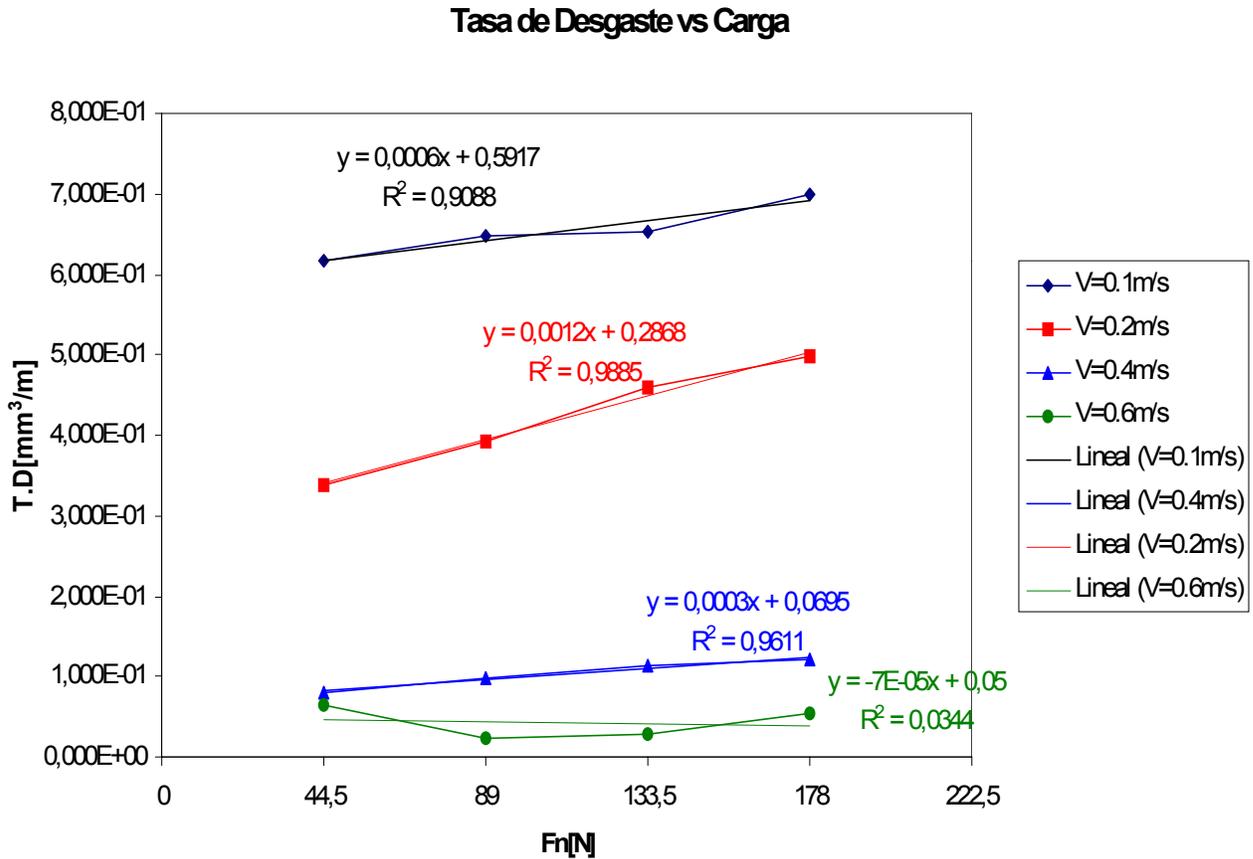
Debido a la carga cíclica las asperezas sufren un proceso de endurecimiento y deformación plástica que contribuye intensamente a la progresión y fractura de las mismas. Estas partículas endurecidas son las que provocan desgarre del material mientras viajan incrustadas en la superficie haciendo cortes de material en forma de surcos que trae como consecuencia un ligero aumento del coeficiente de fricción.

Por otra parte, en el llamado periodo inicial (“running in”), los coeficientes de fricción alcanzan los máximos valores para rápidamente estabilizarse alrededor de un valor promedio en cada una de las categorías de carga. Soom, A. y Kim. C. (1983), al respecto, han estudiado las fluctuaciones en las fuerzas normales y friccionales, y las atribuyen a interacciones entre las rugosidades y a ondulaciones de las superficies deslizantes. Estas fuerzas dinámicas pueden, a juicio de los autores, tener un importante papel en la relación desgaste-fatiga, ya que a las frecuencias consideradas por ellos (2Khz), rápidamente se alcanzan varios millones de ciclos.

#### **4.2.3. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del bloque.**

En la figura 4.6 se observa la gráfica de tasa de desgaste T.D contra carga aplicada  $F_n$ . Se deduce que a la mayor carga, 178N y con el menor valor de velocidad, 0.1m/s resulta la mayor tasa de desgaste. Al aumentar la carga aplicada para cada categoría de velocidad constante, la tendencia es lineal en cada una de ellas, con excepción de la categoría de velocidad constante igual a 0.6m/s.

Este comportamiento se corresponde con la teoría de Archard, J.F., (1953) que predice que el desgaste aumenta en proporción directa al aumento de la carga.



**Figura 4.6: Gráfica de la Tasa de Desgaste promedio T.D en los bloques contra Carga aplicada Fn**

En el caso presente donde no se observa régimen de transición, es decir, cambios en el tipo de desgaste, Welsh, N.C., (1965) encontró, que generalmente existe una dependencia lineal entre la tasa de desgaste y la carga. Lipson, Ch. (1967), por su parte, reseña que el desgaste aumenta casi proporcionalmente con la carga aunque esta relación es afectada por el calor friccional producido en la intercara de contacto. El mayor valor en promedio en la tasa de desgaste para todos los ensayos es  $6.9877E-01 \text{ mm}^3/\text{m}$ , con categoría de velocidad constante  $0.1 \text{ m/s}$  que es la menor, y valor de carga aplicada  $178 \text{ N}$  que es la mayor, a su vez el menor valor en la tasa de desgaste es  $2.3586E-02 \text{ mm}^3/\text{m}$ , con categoría de velocidad constante  $0.6 \text{ m/s}$  y valor de carga aplicada  $89 \text{ N}$ . El aumento más pronunciado en la tasa de desgaste al aumentar la carga resulta para la categoría de velocidad constante igual a  $0.2 \text{ m/s}$ . Los valores más bajos en las tasas de desgaste, se obtienen

para la categoría de velocidad constante con mayor valor, es decir, 0.6m/s y en la que a su vez no se obtiene una relación lineal con el aumento de la carga. Para valores de carga entre 89N y 133.5N, y las categorías de velocidad constante 0.1 m/s; 0.4 m/s y 0.6 m/s el valor en la tasa de desgaste se mantiene casi invariable, con excepción de la categoría de velocidad constante 0.2 m/s.

Se puede concluir entonces que para la categoría de menor velocidad constante, aumentando la carga se obtiene la mayor tasa de desgaste, en comparación con el resto de las categorías de velocidad constante. Igualmente al aumentar la carga, crece el valor en promedio de la tasa de desgaste en la mayoría de los ensayos realizados, lo cual se corresponde con las teorías planteadas con relación al efecto de la carga sobre la tasa de desgaste.

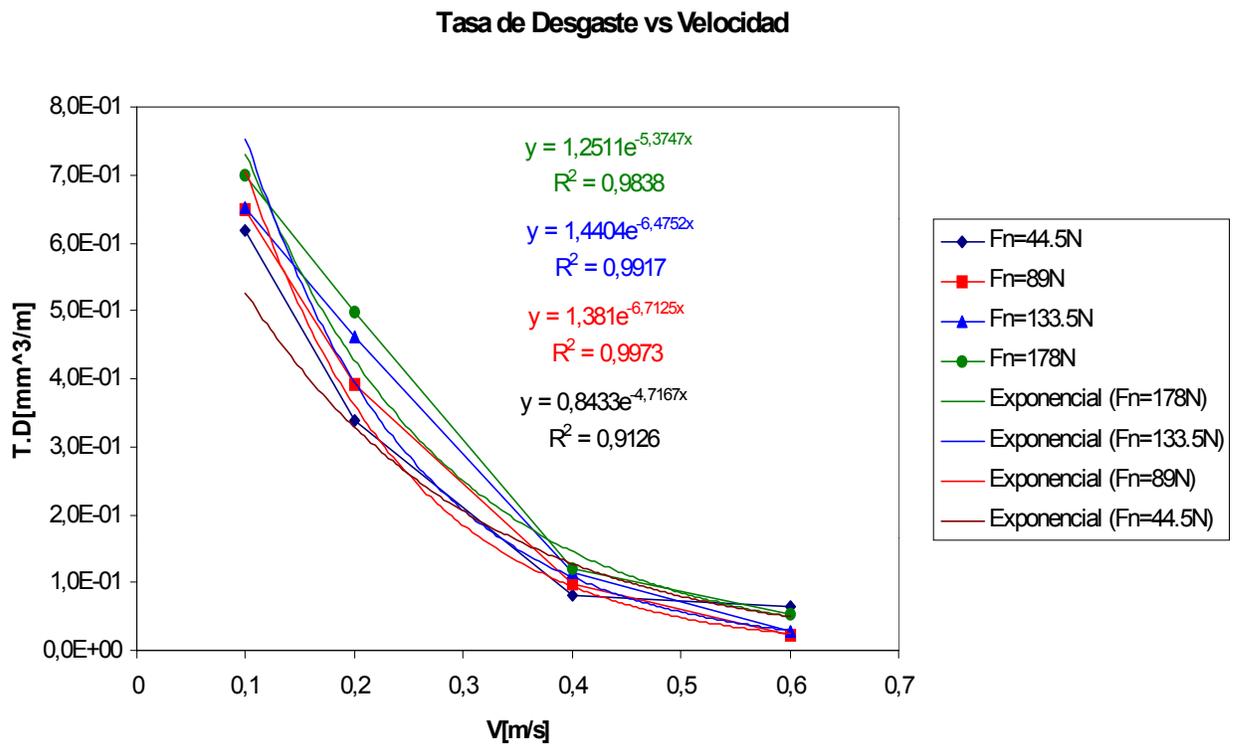
Entre esas teorías esta la del desgaste oxidativo, trabajo realizado por Quinn, T. et al (1980-1985), que afirma que las tasas de desgaste son proporcionales a la carga mientras el tipo de óxido presente no varíe. Los cambios bruscos de temperaturas superficiales, por otra parte irían acompañados de variaciones súbitas en la tasa de desgaste. El número de asperezas sería linealmente dependiente de la carga para un intervalo de velocidad de oxidación determinado y el radio de cada contacto inter-asperezas sería aproximadamente constante para combinación de materiales. El espesor crítico de la capa de óxidos, sería aproximadamente de 2 micrones para todas las condiciones estudiadas por ellos.

Según esta teoría, la dependencia con la carga de la temperatura a la cual ocurre la oxidación en las áreas reales de contacto tiende a seguir el mismo patrón que la variación de temperatura superficial. Esto explicaría el comportamiento lineal de la tasa de desgaste con la carga antes o después de las transiciones, pues un incremento en la primera aumentaría la velocidad de oxidación de manera que se alcanzaría un espesor crítico rápidamente

#### **4.2.4. Efecto de la velocidad sobre la Tasa de Desgaste del bloque.**

En general, para todas las categorías de carga constante, a través de todo el rango de velocidad, el efecto de la misma es a disminuir la tasa de desgaste de los bloques. Esta tendencia en todos los casos lo hace de forma exponencial a medida que aumenta la velocidad, como se puede observar en la gráfica de la figura 4.7.

El mayor valor en la tasa de desgaste para la totalidad de ensayos realizados en promedio, resulta en el rango de valores de menor velocidad, es decir, 0.1m/s, en la categoría de mayor carga, 178N. El valor que se obtiene es 6.9877E-01 mm<sup>3</sup>/m. Por el contrario el menor valor en la tasa de desgaste, resulta con la mayor velocidad, 0.6m/s y categoría 89N de carga aplicada, con un valor de 2.3586E-02 mm<sup>3</sup>/m.



**Figura 4.7: Gráfica de Tasa de desgaste promedio sobre los bloques T.D contra velocidad de deslizamiento V**

En general al aumentar la velocidad para todas las categorías de carga constante, la tasa de desgaste disminuye. La Tasa de Desgaste descendió en el orden creciente del rango de velocidad para todas las cargas.

En conclusión, a medida que aumenta la velocidad el efecto sobre la tasa de desgaste es a disminuirla. A mayor velocidad la temperatura superficial crece con mayor rapidez, el coeficiente de fricción a su vez disminuye y al mismo tiempo la presión de contacto decrece rápidamente al

aumentar el área, por lo que el proceso de surcado sobre la superficie del bloque se hace con menor intensidad. Las partículas de desechos o “debris” son atrapadas con instantes de tiempo más cortos sobre los valles o crestas superficiales en el contacto y contribuyen en menor medida al desgaste.

Como en el caso de dos metales similares, debido al endurecimiento por deformación, las juntas soldadas en frío se hacen más resistentes que el volumen de ambos metales, produciendo en consecuencia el desprendimiento de partículas grandes de los dos cuerpos (Tabor, D. 1973), explicando así las altas tasas de desgaste observadas cuando se hacen deslizar dos materiales metálicos idénticos. Esto se da en condiciones de menor velocidad al presentarse el deslizamiento.

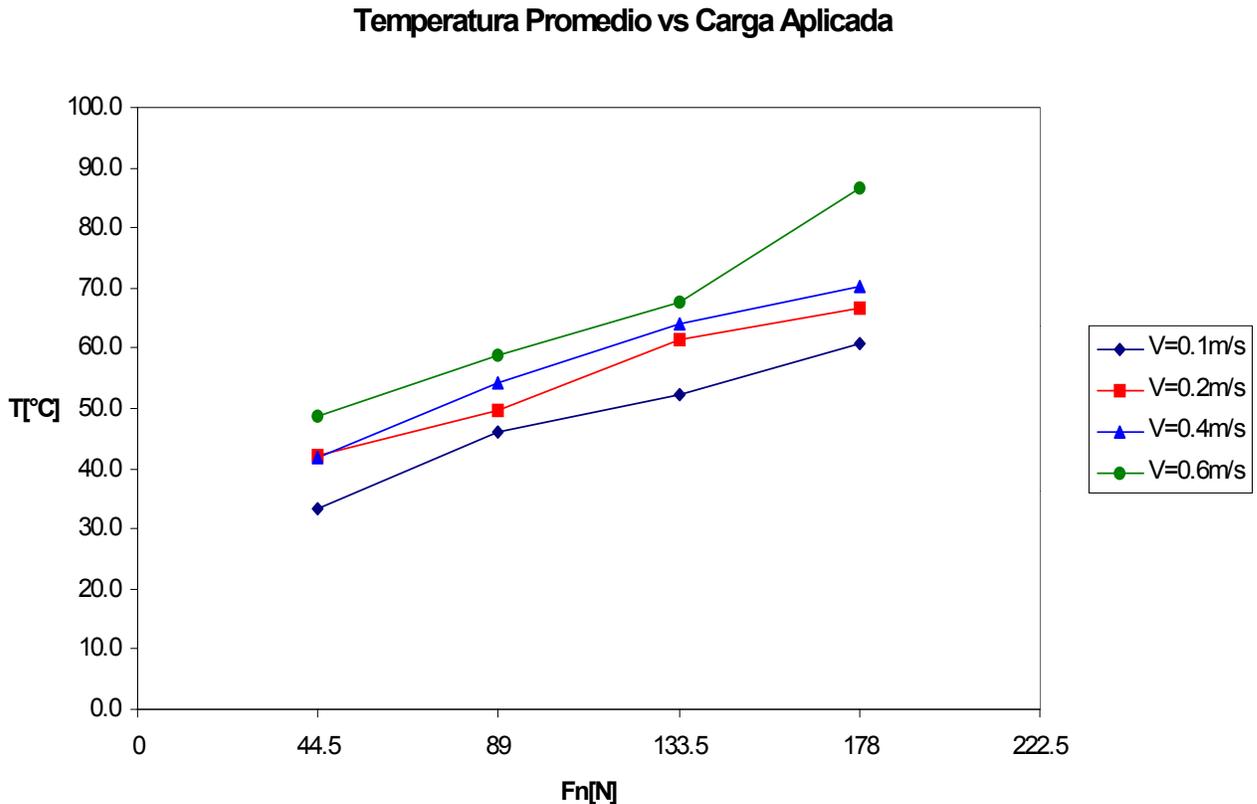
Igualmente la regeneración de óxidos es menor a medida que la velocidad es mayor, por lo que la lubricación entre las superficies disminuye y se presenta la posibilidad de una mayor tasa de desgaste. El espesor del óxido está determinado por el tiempo disponible para reoxidar una región despojada de los mismos y por la velocidad de formación del óxido. Ese tiempo de reoxidación está determinado solo por la velocidad de deslizamiento.

#### **4.2.5. Efecto de la carga sobre la temperatura.**

Para todo el rango de carga la tendencia de los valores para la temperatura promedio es creciente para cada categoría de velocidad, como se observa en la gráfica de temperatura promedio  $T$  contra carga aplicada  $F_n$  de la figura 4.8. A continuación se tienen los siguientes valores en los promedios de temperatura para cada una de las cargas (44.5N; 89.0N; 133.5N; 178.0N) en todas las categorías de velocidad: 41.5575 °C, 49.6625°C, 61.3825 °C y 70.98 °C respectivamente.

En conclusión al aumentar la carga, la temperatura para cada velocidad es mayor en orden creciente del nivel de velocidades. Al aumentar la carga entre 133.5N y 178N manteniendo constante la velocidad en 0.1m/s, el comportamiento de la tendencia en los valores de la temperatura es aproximadamente lineal. Para el resto, es decir, 0.2; 0.4 y 0.6m/s la tendencia no es lineal. El mayor valor de temperatura en promedio fue 86.47°C para dos ensayos cuyos valores fueron 92.91°C y 80.04°C, correspondientes para una carga aplicada de 178N y velocidad de

0.6m/s. Los valores de la temperatura al finalizar cada uno de estos ensayos son 110°C y 94°C, los cuales representan los valores máximos absolutos de todos los ensayos realizados.



**Figura 4.8: Gráfica de temperatura promedio T contra carga aplicada Fn**

El mínimo valor de temperatura en promedio resultó 33.4°C, correspondiente a una carga de 44.5N y valor de velocidad 0.1m/s.

Según la teoría de las microsoldaduras (Bowden, F.B. y Tabor, D. 1954-1964), en un primer instante de funcionamiento, que se caracteriza por la destrucción mecánica de las asperezas, que son despuntadas hasta que aumenta la superficie real de contacto, y se llega a un reparto regular de la carga, los efectos dinámicos del choque entre las asperezas y los efectos térmicos de calentamiento microlocalizados son los más graves. El gradiente de temperatura creado, da lugar a una dilatación diferencial y, como consecuencia, a la creación de tensiones. Debido a esto, son importantes propiedades tales como la conductividad de calor y el módulo de elasticidad, de

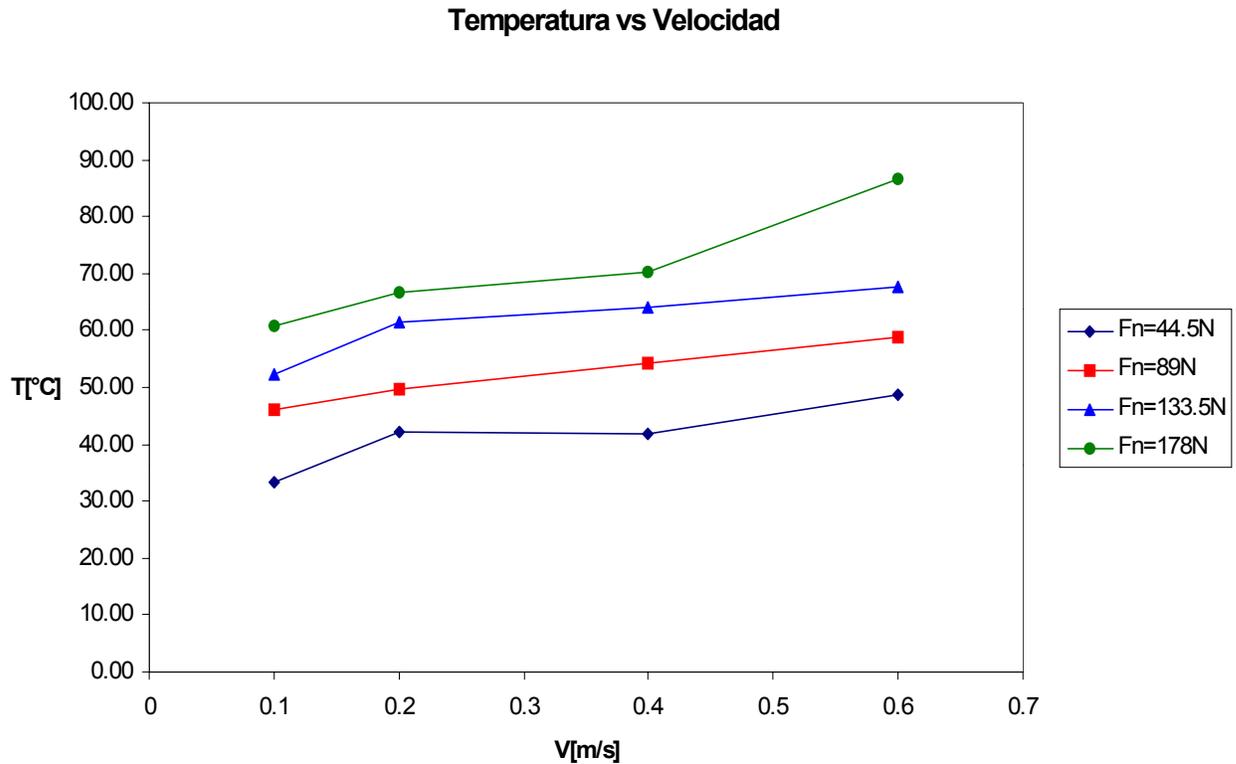
manera de soportar la fatiga térmica. Al aumentar la temperatura disminuye el módulo elástico del material, por lo que la resistencia del material al choque térmico, es decir, la estabilidad del material bajo condiciones en las que hay una producción instantánea de calor, es muy importante. Las deformaciones, que en general, sobrepasan el límite elástico, combinadas con la elevación de temperaturas que se produce en la zona de contacto, causan variaciones cristalinas microlocalizadas, se llega a alcanzar el punto de fusión de uno de los metales en contacto, aunque sea en forma puntual y fugaz, y se originan microsoldaduras. Debido a la elevación de la temperatura, se produce, como ya se señaló, una rápida disminución del límite elástico en la zona de contacto, generándose fenómenos físicos (difusión, temple), transformaciones de fase, etc.; produciéndose una distorsión de la estructura cristalina por el efecto combinado de las deformaciones y la temperatura. En el movimiento y el contacto se produce una cierta cantidad de calor que es preciso eliminar, y que no se reparte de igual forma entre los dos cuerpos en contacto, interviniendo en ello la conductividad térmica, la densidad, y fundamentalmente las velocidades relativas de las piezas. La elección de una pieza en lo que respecta a su forma y el material se complementa con la disposición adecuada para la eliminación del calor.

#### **4.2.6. Efecto de la velocidad sobre la temperatura.**

Al aumentar la velocidad, aumenta la temperatura para todos los ensayos, como se puede observar en la gráfica de la temperatura promedio  $T$  contra velocidad de deslizamiento de la figura 4.9.

Para 0.6m/s y cargas 44.5N y 89N, los valores de temperatura fueron 48.82°C y 48.87°C respectivamente, lo que indica que fueron prácticamente iguales. Desde los valores de velocidad de 0.2m/s hasta 0.6m/s, con carga igual a 133.5N, la tendencia fue lineal. Según la gráfica el promedio para 0.1; 0.2; 0.4 y 0.6m/s, en todo el rango de carga fueron, 48.0725 °C; 54 95 °C; 57.63 °C y 62.93 °C respectivamente.

Del análisis del efecto de la carga sobre la temperatura, se puede ver que la temperatura no solo aumenta con la carga sino que aumenta al mismo tiempo con el aumento de la velocidad, lo que indica que no solo el desgaste ocurre por la acción de la fuerza aplicada sino también por la acción del calor de fricción, es decir, con la acción combinada de ambos.



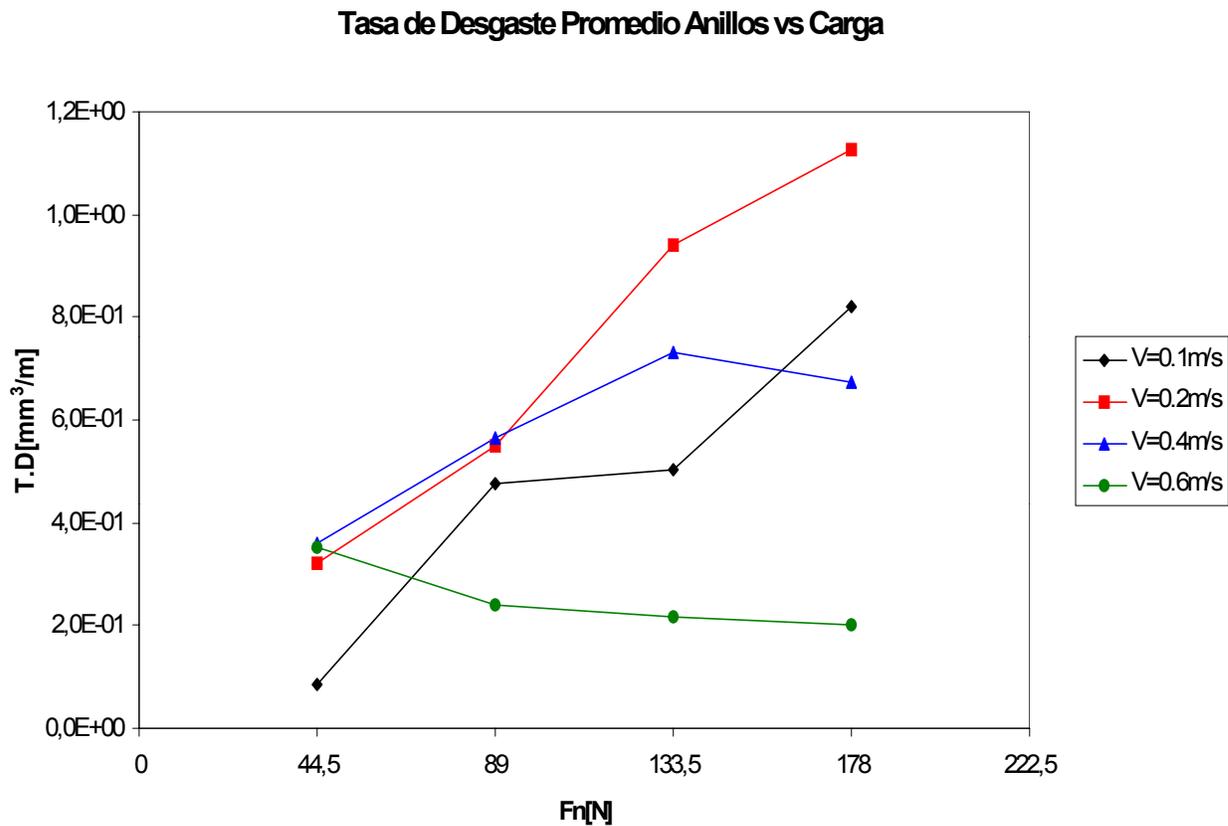
**Figura 4.9:** Gráfica de temperatura promedio  $T$  del bloque contra velocidad de deslizamiento  $V$

Haciendo una comparación del efecto de la carga y el efecto de la velocidad sobre la temperatura, se observa de las gráficas pertenecientes a las figuras 4.8 y 4.9, que el efecto de la carga es más pronunciado para cada categoría de velocidad, y que el efecto de la velocidad produce una tendencia más estable en la temperatura en cada categoría de carga aplicada, por lo que indica que el efecto de la carga sobre la temperatura es más pronunciado que el efecto de la velocidad sobre la misma.

Como se menciona en el análisis anterior; en el movimiento y el contacto se produce una cierta cantidad de calor que es preciso eliminar, y que no se reparte de igual forma entre los dos cuerpos en contacto, con el aumento de velocidad se llega a alcanzar con mayor rapidez el punto de fusión de uno de los metales en contacto, lo cual origina las microsoldaduras, sin embargo la misma disposición de las piezas en lo que respecta a su forma y el material contribuye a que el efecto de mayor velocidad contribuya con la mayor eliminación del calor.

#### 4.2.7. Efecto de la carga sobre la tasa de desgaste del anillo

Para todas las categorías de velocidad constante, al aumentar la carga la tasa de desgaste aumenta, con excepción únicamente para la categoría de velocidad constante igual a 0.6m/s en la que la tasa de desgaste disminuye, como se puede observar en la gráfica de tasa de desgaste contra carga aplicada de la figura 4.10.



**Figura 4.10: Gráfica de la tasa de desgaste T.D promedio de los anillos contra carga aplicada**

Igualmente con excepción para la categoría de 0.4m/s y el rango de carga desde 133.5N a 178N la tasa de desgaste disminuye. El menor valor en la tasa de desgaste que se obtiene es  $8.3951 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{m}$  para categoría de velocidad constante igual 0.1m/s y valor de carga igual a 44.5N. El mayor valor en la tasa de desgaste que se obtiene es  $1.1266 \text{ mm}^3/\text{m}$  para categoría de velocidad constante igual 0.2m/s y valor de carga igual a 178N. El único comportamiento de

tendencia lineal en la tasa de desgaste, con el aumento de la carga, se observa en la categoría de velocidad constante igual a 0.4m/s y valores de carga entre 44.5N y 133.5N.

Los aumentos de las tasas de desgaste para las diferentes categorías de velocidad constante con el aumento de la carga, en comparación a los desgastes observados por los bloques, es decir, por su par tribológico, son más acentuados.

Las tendencias en el crecimiento de las tasas de desgaste de los anillos son de mayor pendiente aunque no sean lineales. Este comportamiento se puede deber al proceso de adhesión de partículas de desgaste del bloque a los anillos que quedan impregnadas en los mismos.

En general, el comportamiento de la tasa de desgaste de los anillos con el aumento de la carga, se corresponde a las diversas teorías que explican el comportamiento de su par tribológico, es decir, al aumentar la carga aumenta la tasa de desgaste, respetando las condiciones de no-transición en el régimen de desgaste, en nuestro caso un solo régimen que es desgaste severo.

#### **4.2.8. Efecto de la velocidad sobre la tasa de desgaste del anillo**

Se puede establecer del gráfico de tasa de desgaste contra velocidad de deslizamiento perteneciente a la figura 4.11 lo siguiente:

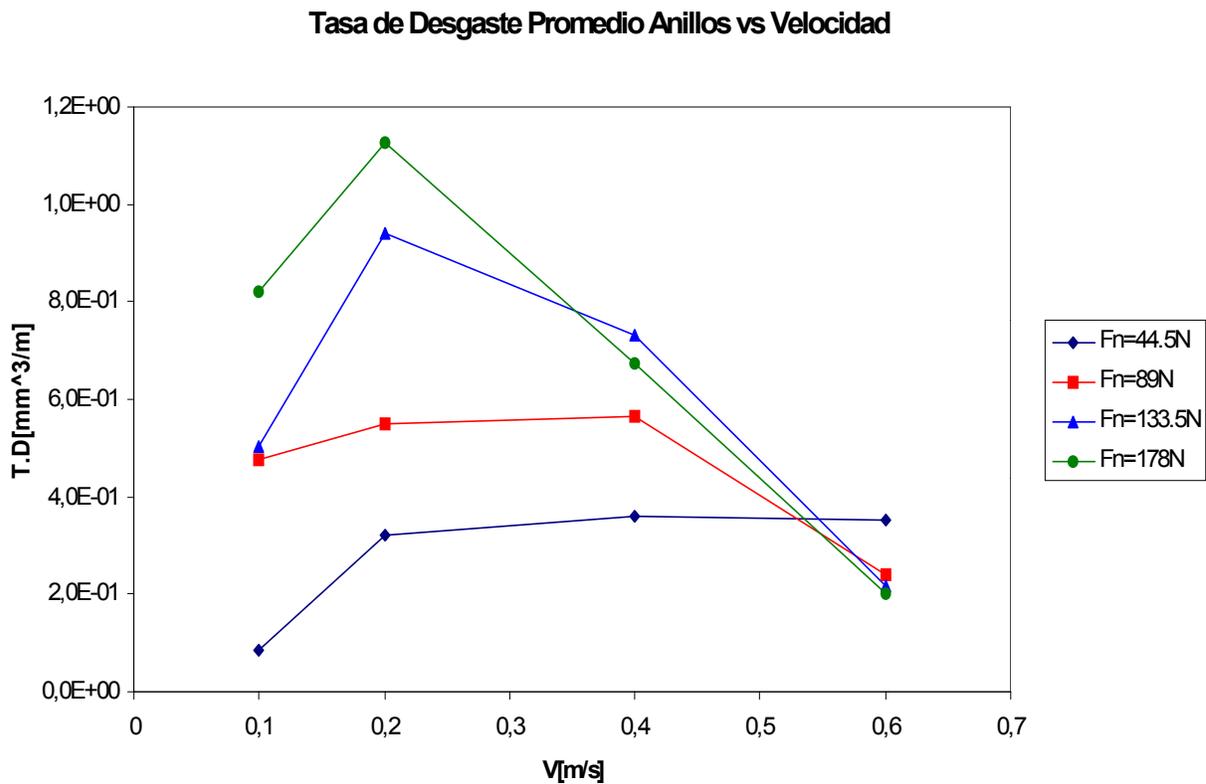
La tendencia en la tasa de desgaste aumenta solo entre 0.1m/s y 0.2m/s para todas las categorías de carga aplicada constante. A partir de 0.2m/s hasta 0.6m/s la tendencia es a disminuir o a lo sumo a ser estable para todas las categorías de carga aplicada constante.

Existe una marcada tendencia en la tasa de desgaste a disminuir en la medida que se aumenta la velocidad para las diferentes categorías de carga, siendo mas pronunciada esta tendencia para las cargas más altas y menos pronunciada para la carga más baja, es decir, 44.5N. Esto evidencia un fuerte efecto de la velocidad de disminuir la tasa de desgaste, a partir de cargas normales aplicadas superiores a 89N y velocidades superiores a 0.2m/s.

Además, es importante señalar los valores obtenidos en la tasa de desgaste para la velocidad más alta ya que, a excepción de la carga constante más baja, para las otras categorías de cargas, esos valores (Tasa de Desgaste) tienden a ser prácticamente iguales, es decir, 2.3983E-01, 2.1858E-01 y 1.9978E-01 mm<sup>3</sup>/m. Los valores más estables o sin cambio aparente son para la

categoría de 89N de carga aplicada, entre 0.2m/s y 0.4m/s que son  $5.5111E-01$  y  $5.6618E-01$   $\text{mm}^3/\text{m}$ .

En general de este último comportamiento, se puede establecer que la velocidad tiene un gran efecto sobre la tasa de desgaste, solo a partir de 0.2m/s de velocidad de deslizamiento.



**Figura 4.11: Gráfica de la tasa de desgaste T.D promedio de los anillos contra velocidad de deslizamiento V**

### 4.3 Régimen de desgaste

Para la determinación de los regímenes de transición en el desgaste se hace el cálculo del coeficiente específico de desgaste  $k$  de la ecuación de Archard, J.F., también comparaciones de los valores de tasa de desgaste calculados con los valores de tasas de desgaste de otros trabajos,

tanto para los bloques así como para los anillos y cambios bruscos en la tasa de desgaste por incrementos de la carga, observados en las gráficas de las figuras 4.6 y 4.10.

En las tablas 4.9 y 4.11 se presentan los valores de tasa de desgaste y coeficiente específico de desgaste  $k$ , tanto para los bloques como para los anillos respectivamente. Un valor típico en el coeficiente específico de desgaste  $k$  es  $7.0E-03$ , según tabla 2.4, para ensayo esfera sobre disco o “pin on disk”, con valores en el rango entre 0.18 y 0.8 para el coeficiente de fricción  $f$ , con condición de deslizamiento en seco y par tribológico acero-acero. El valor para el coeficiente de fricción  $f$  en el presente trabajo, es decir, en promedio para todo los ensayos es 0.67, y los valores para el coeficiente específico de desgaste  $k$  obtenido se acerca al valor típico mencionado, como se puede observar en las tablas 4.9 y 4.11 para los bloques y los anillos respectivamente. Los valores mínimo y máximo obtenidos para el coeficiente específico de desgaste  $k$  en los bloques son,  $1.4703E-03$  y  $1.1091E-01$ , respectivamente. Igualmente los valores mínimo y máximo de  $k$  obtenidos en los anillos son,  $7.9274E-03$  y  $5.7340E-02$ , respectivamente.

Respecto a los valores como referencias para el tipo de régimen de desgaste, el mínimo valor en la tasa de desgaste en los bloques para todos los ensayos es de  $2.3586E-02$   $\text{mm}^3/\text{m}$ . Igualmente el mínimo valor en la tasa de desgaste en los anillos para todos los ensayos es  $8.3951E-02$   $\text{mm}^3/\text{m}$ . Estos valores en comparación con los trabajos realizados por Welsh, N. (1965), en los que considera valores en la tasa de desgaste mayores de  $5E-03$   $\text{mm}^3/\text{m}$  para desgaste severo, confirma el tipo de régimen de desgaste, tanto para el bloque como para el anillo.

Haciendo la comparación con los valores para la tasa de desgaste específica obtenidos por Wang. Y.(1999), en el que utiliza como par tribológico al acero AISI 52100 contra el acero AISI 1080, con desgaste de tipo deslizante sin lubricación, y en los que considera valores entre  $1E-08$  y  $2E-08$   $\text{mm}^3/(\text{N}*\text{mm})$  como los de desgaste de transición entre desgaste suave y desgaste severo, el menor valor obtenido para la tasa de desgaste específica es  $2.08159E-07$   $\text{mm}^3/(\text{N}*\text{mm})$  en los bloques y  $1.1224E-06$   $\text{mm}^3/(\text{N}*\text{mm})$  en los anillos, lo cual indica que los ensayos se realizaron bajo un régimen de desgaste severo.

En cuanto a los cambios bruscos que se pueden observar en las gráficas de tasa de desgaste contra carga aplicada para categorías de velocidad constante (Figuras 4.6 y 4.10) en los bloques y anillos, se puede afirmar lo siguiente. En los bloques, para todas las categorías de velocidad

constante, con excepción de la categoría de 0.6m/s, las gráficas son lineales y el rango de valores para la tasa de desgaste se mantiene en un régimen de desgaste severo en todos los casos, indicando la ausencia del régimen de transición. Para los anillos únicamente en la categoría de 0.1m/s de velocidad constante se observa cambios significativos al aumentar la tasa de desgaste entre 44.5N y 89N, para luego mantenerse aproximadamente constante entre 89N y 133.5N, y aumentar nuevamente entre 133.5N y 178N. Sin embargo, el rango de valores para la tasa de desgaste se mantiene en un régimen de desgaste severo en todo el rango de carga aplicada, por lo que no presenta transiciones en el régimen de desgaste.

#### **4.4 Mecanismos de desgaste**

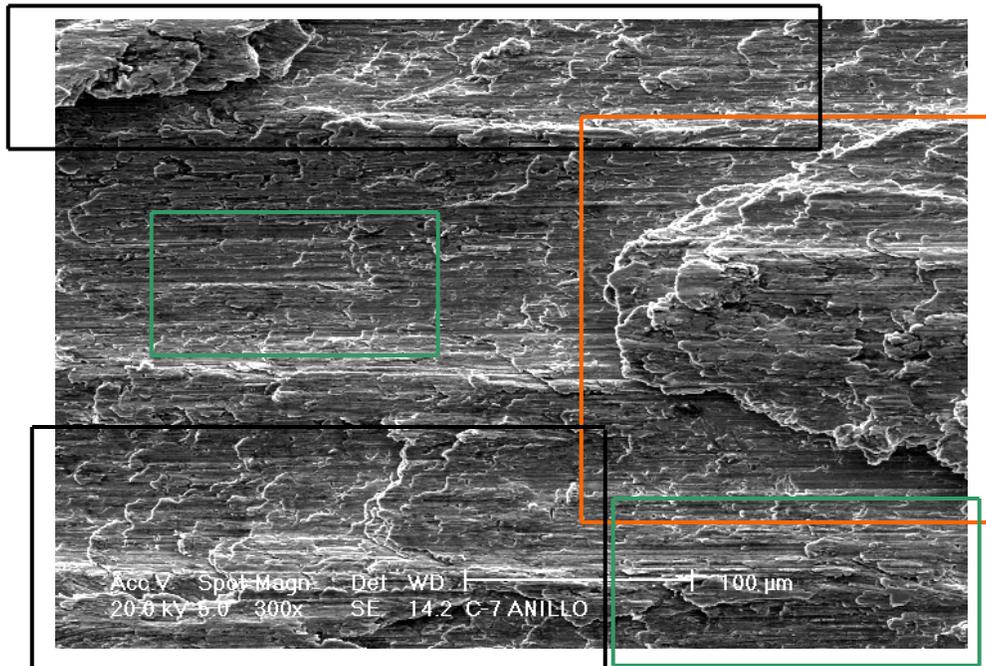
Como ya se mencionó con anterioridad, existen diversos mecanismos de desgaste y de igual manera diversas teorías que tratan de explicarlo. Por esta razón se procurará ahora realizar un estudio de las huellas producto del desgaste del par tribológico, con la finalidad de establecer los mecanismos que actuaron en los ensayos realizados para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Las huellas se estudiaron mediante microscopia electrónica de barrido, obteniéndose rasgos en las huellas que denotan diversos mecanismos de desgaste, los cuales observaremos y analizaremos ahora.

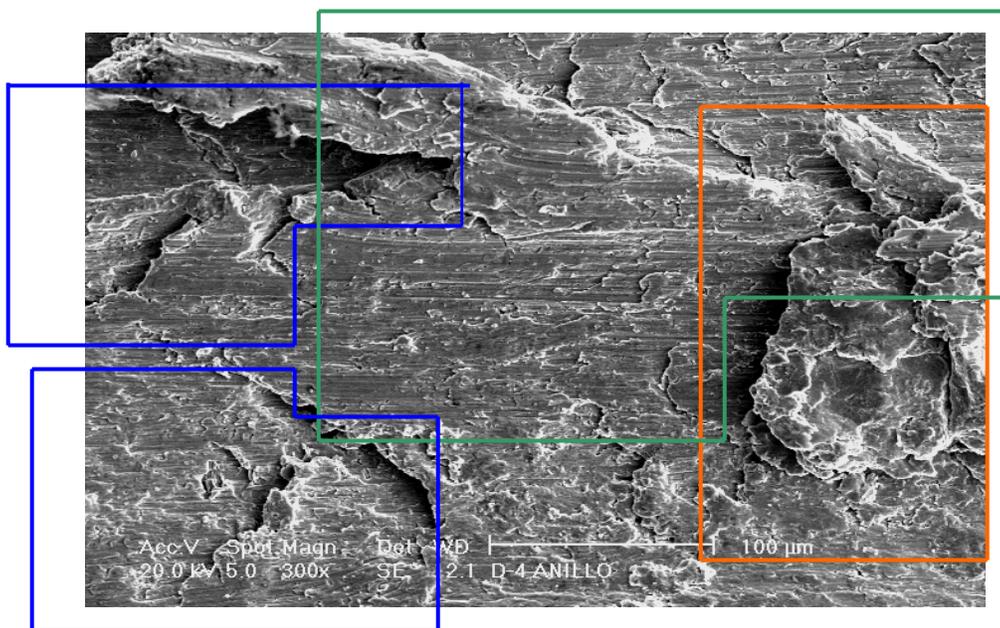
En primer lugar, se establecerá una comparación entre dos huellas de anillos sometidos a la misma carga, pero a diferentes velocidades.

##### **4.4.1 Efecto de la velocidad**

Al realizar la comparación entre estas dos micrografías se puede observar un acentuado proceso de adhesión en la fig 4.13 (zona naranja), donde la velocidad de deslizamiento es mucho menor que en la fig 4.12 ( 0.2 y 0.6 m/s respectivamente). Esto en concordancia con la teoría de adhesión de Tabor (1973) que establece que al comienzo del ensayo las superficies se encuentran libres de impurezas y por tanto las asperezas tienen la tendencia a adherirse a la otra superficie por un proceso de micro-soldadura.



**Fig. 4.12: Huella desgastada del anillo (MEB 300X)**  
 $F_n=44.5\text{N}$ ;  $v=0.6\text{m/s}$



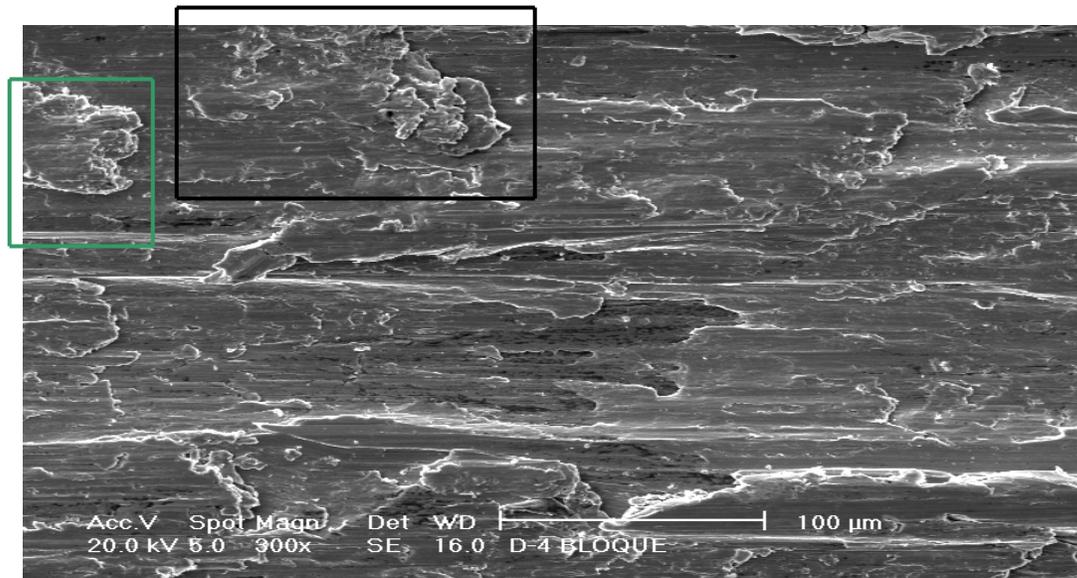
**Fig 4.13: Huella desgastada del anillo (MEB 300X)**  
 $F_n = 44.5\text{N}$ ;  $v = 0.2\text{m/s}$

También se puede establecer que a pesar de existir adhesión a altas velocidades (zona naranja, fig. 4.12), da la impresión de no ser el único mecanismo presente, ya que la existencia de “capas” de material a lo largo de la micrografía (zonas negras, fig. 4.12) sugiere la existencia de un mecanismo de delaminación.

Además se debe observar la existencia de un rayado inicial (zonas verdes, figs. 4.12 y 4.13) en cada una de las micrografías estudiadas, el cual se puede explicar como el efecto del deslizamiento entre las asperezas de la superficie aunado a los altos esfuerzos de contacto presentes en los ensayos. Es de hacer notar, en la fig. 4.13, la existencia de profundos surcos (zonas azules), los que no se observan a altas velocidades, que podrían ser explicados como el desprendimiento o desplazamiento de mesetas generadas por partículas abrasivas producidas en el desgaste. Todo esto según la teoría del deterioro cíclico propuesta por Blau en 1981.

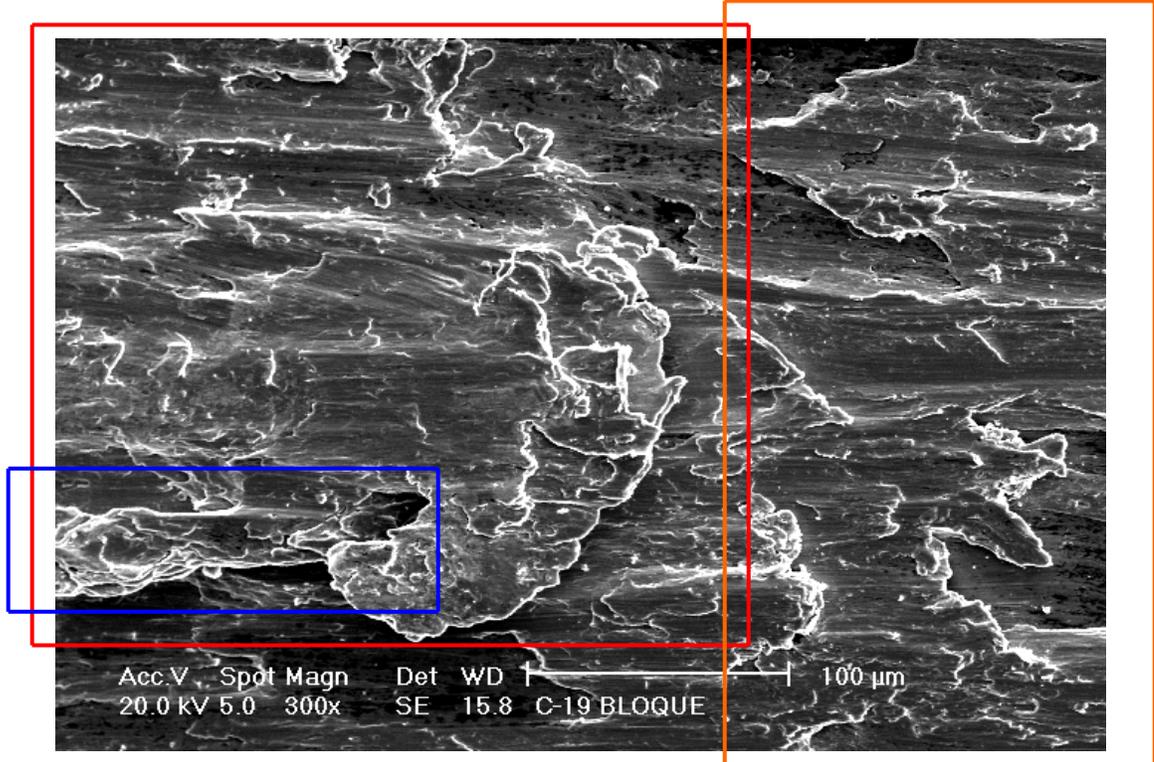
#### 4.4.2 Efecto de la carga aplicada

Para poder observar el efecto de la carga, analizaremos que sucede con dos ensayos a la misma velocidad, pero con diferentes cargas aplicadas. Para ello estudiaremos las siguientes figuras:



**Fig 4.14; Huella desgastada del bloque (MEB 300X)**

**$v= 0.2\text{m/s}$ ;  $F_n=44.5\text{N}$**



**Fig. 4.15: Huella desgastada del bloque (MEB 300X)**

**$v = 0.2\text{m/s}$ ;  $F_n=133.5\text{N}$**

Se puede mencionar, en primera instancia, la presencia de varios mecanismos de desgaste en ambas micrografías, unos con mayor presencia que otros.

Se nota que a menor carga, Fig 4.14, existen pequeñas zonas indicativas de un desgaste adhesivo ligero (zona verde y negra), lo que va en contraposición con la micrografía a una carga mayor (3 veces), Fig 4.15, donde se observa una zona claramente definida con la presencia de adhesión, (zona roja), y que según la escala grafica es aproximadamente 4 veces el tamaño de las zonas adhesivas de la fig. 4.14, que es a menor carga.

La presencia de capas de material en la micrografía a 133.5N, fig. 4.15 (zona anaranjada), denota la existencia de un mecanismo de delaminación, evidentemente más pronunciada en esta grafica que en la de 44.5N, fig. 4.14.

Las características topográficas de las dos micrografías demuestran que a mayor carga la Tasa de Desgaste es mayor (Tabla 4.8) ya que se observa mayor daño sobre una superficie (Fig. 4.15) que sobre la otra (Fig. 4.14).

En la Fig. 4.15, se presentan algunas zonas donde se observan grietas (zona azul), las cuales son explicadas a través de la teoría de deterioro cíclico.

Finalmente se puede establecer que los diversos mecanismos de desgaste tratados en este trabajo especial de grado (adhesión, abrasión, fatiga, entre otros), se presentaron en los ensayos realizados, como lo demuestra el análisis efectuado, haciendo notar como la variación de las condiciones del ensayo influyen en la presencia más o menos acentuada de alguno de los mecanismos anteriormente descritos.

**CAPITULO V**  
**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## 5.1 Conclusiones

Del análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede concluir que:

- El coeficiente de fricción se mantiene estable, es decir, invariable para cada una de las categorías de velocidad constante al aumentar la carga, con excepción de la categoría de 0.6 m/s de velocidad, en el rango de carga aplicada que va desde los valores de 44.5 N a 89 N en donde se aprecia una disminución promedio más pronunciada.
- El coeficiente de fricción disminuye con el aumento de la velocidad de deslizamiento, para todas las categorías de carga normal aplicada. La disminución en los valores en el coeficiente de fricción promedio va desde 0.8235 para una carga aplicada de 89N y velocidad de deslizamiento igual a 0.1m/s, hasta 0.5182 para una carga aplicada de 89N y velocidad de deslizamiento igual a 0.6m/s.
- Comparando el valor máximo en el coeficiente de fricción  $f$  a la más baja velocidad y el valor mínimo a la más alta velocidad, la disminución está en un factor de 1.57, que se acerca al comportamiento de los aceros, en la que la reducción del valor es a menos de la mitad.
- La tasa de desgaste en los bloques aumenta al aumentar la carga normal aplicada, para todas las categorías de velocidad de deslizamiento constante.
- La tendencia en el aumento de la tasa de desgaste en los bloques, como efecto del aumento de la carga aplicada para cada categoría de velocidad constante, es lineal en cada una de ellas, con excepción de la categoría de velocidad constante igual a 0.6m/s.
- Los mayores valores de la tasa de desgaste en los bloques, se obtienen para la categoría de menor velocidad constante, es decir, 0.1m/s y para todo el rango de carga, en comparación con el resto de las categorías de velocidad constante.
- La tasa de desgaste en los bloques disminuye al aumentar la velocidad de deslizamiento, para todas las categorías de carga aplicada constante.

- La tendencia en la disminución de la tasa de desgaste en los bloques, como efecto del aumento de la velocidad para todas las categorías de carga aplicada constante, lo hace en forma exponencial.
- Al aumentar la carga aplicada, la temperatura aumenta para todas las categorías de velocidad de deslizamiento.
- Al aumentar la velocidad, la temperatura aumenta para todas las categorías de carga aplicada
- La tasa de desgaste en los anillos aumenta al aumentar la carga normal aplicada, para todas las categorías de velocidad de deslizamiento constante. Al comparar dichos aumentos con los observados por los bloques, es decir, por su par tribológico, son más acentuados.
- Las tendencias en el crecimiento de las tasas de desgaste de los anillos al aumentar la carga son más pronunciadas que las que presentan los bloques, observándose el único comportamiento de tendencia lineal en la categoría de velocidad constante igual a 0.4m/s y valores de carga entre 44.5N y 133.5N. Este comportamiento se puede deber al proceso de adhesión de partículas de desgaste del bloque a los anillos que quedan impregnadas en los mismos.
- La tasa de desgaste en los anillos disminuye con un fuerte efecto al aumentar la velocidad de deslizamiento, a partir de cargas normales aplicadas superiores a 89N y velocidades superiores a 0.2m/s.
- Los valores de tasas de desgaste obtenidos indican que los ensayos se mantuvieron dentro de un régimen de desgaste severo.
- Se determinó un acentuado proceso de adhesión en los anillos para baja velocidad y un proceso mixto de adhesión y delaminación a alta velocidad, ya que se detecta la presencia de “capas” de material.
- Se determinó la existencia de profundos surcos en los anillos a baja velocidad, que podrían ser explicados como el desprendimiento o desplazamiento de mesetas generadas por partículas abrasivas producidas en el desgaste, lo que sugiere un mecanismo abrasivo y de deterioro cíclico (fatiga).

- Se determinó pequeñas zonas indicativas de un desgaste adhesivo ligero en los bloques y zonas claramente definidas con la presencia de adhesión a medida que aumenta la carga aplicada.
- Se determinó la presencia de capas de material en los bloques que son más pronunciadas según la mayor o menor carga aplicada, lo que denota a su vez la existencia de un mecanismo de delaminación.
- Se determinó en los bloques la presencia de algunas zonas donde se observan grietas, las cuales indican la existencia de un mecanismo de desgaste por deterioro cíclico o fatiga.

## 5.2 Recomendaciones

- Mejorar las condiciones de funcionamiento del Laboratorio de Lubricación y Desgaste, para el mejor control de variables como la humedad y la temperatura principalmente, mediante su acondicionamiento, como aire acondicionado y mantenimiento constante de las condiciones ambientales y de higiene.
- Evaluar la posibilidad de que se instale una interfase para la conexión de una computadora personal (PC) con la máquina de ensayo Falex N°1 para la recopilación de datos computarizados, con el objetivo de una mayor facilidad y precisión de la información recabada.
- Reparar el dial indicador de la penetración, ya que es imprescindible para hacer las gráficas maestras de tasa de desgaste contra distancia de deslizamiento, las cuales son muy importantes para el análisis del comportamiento de la resistencia al desgaste.
- Seguir realizando pruebas con diferentes niveles de carga normal, con la finalidad de obtener la carga de transición entre el régimen de desgaste suave y severo.
- Utilizar la configuración geométrica de cilindro cruzado, para evaluar el desgaste del acero AISI 4340 bajo las mismas condiciones establecidas para las variables operacionales, con la finalidad de determinar una relación cuantitativa entre ellas.
- Realizar las operaciones de limpieza, almacenamiento y manipulación de las muestras antes y después de los ensayos, siguiendo estrictamente lo que indique las normas respectivas, para su protección de la oxidación, y para la mejor evaluación de las superficies de desgaste por microscopía electrónica de barrido.
- Evaluar el desgaste por deslizamiento de diferentes aceros que se utilizan en la construcción de elementos de máquinas, con la finalidad de recabar la información necesaria de cada uno de estos, lo cual sería de gran utilidad para la aplicación en el área de la ingeniería mecánica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHANSON, E. P.; JAHAMIR, S.; COLLING, D. A. y SUH, N., (1974), “**Failure by delamination during wear**”, Proceedings of the workshop on Failure Analysis and the SEM IIT Research Institute, EE.UU., pp. 889-894
- ALLEN, C. B.; QUINN, T. F. J. y SULLIVAN, J. L., (1985), “**The oxidational wear of high-chromium ferritic steel on austenitic stainless steel**”, Journal of Tribology, V. 107., pp.172-179
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS COMMITTEE ON WEAR RESISTANCE, (1961), “**The selection of steel for wear resistance**”, Metals Handbook, V.1, Properties and Selection, 8<sup>a</sup> Ed., A.S.M., EEUU., pp. 244-257.
- AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS, (1988), “**Standard Test Method for Calibration and Operation of the Falex Block-on-Ring Friction and Wear Testing Machine**”, ASTM, Designation: D 2714-88.
- ARCHARD, J. F., (1953), “**Contact and rubbing of flat surfaces**”, Journal of Applied Physics, V. 24., pp. 981-988.
- ARCHARD, J. F. y HIRST, W., (1956), “**The wears of metals under unlubricated condition**”, Proceedings of the Royal Society, A236.
- BAYER, R. G. y WILSON, J. T., (1971), “**Designing for wear characteristics of members in sliding mechanisms**”, Design Engineering Conference and Show, A.S.M. publications, Nueva York, ASME publication N° 71-DE-39; 7 p.
- BEGELINGER, A y DE GEE, A. W. J., (1978), “**Wear in lubricated journal bearings**”, (Wear of materials, ASME 1977), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D. A. y Glaeser, W. A. (Editores), American Society for Metals, EE.UU., pp. 132-139
- BENTLEY, R. M. y DUQUETTE, D. J., (1981), “**Environmental considerations in wear processes**”, Fundamentals of friction and wear of materials, Rigney, D. A. (Ed.), A.S.M., pp. 291-329.
- BISSON, E.E.; JOHNSON, R.L.; SWIKERT, M.A. y GODFREY, D.,(1955), “**Friction, wear, and surface damage of metals as affected by solid surface films**”, NACA TN 3444.
- BLAU, P. J., (1981), “**Mechanisms for transitional friction and wear behavior of sliding metals**”, Wear, V. 72., pp. 55-66.

- BLAU, P. J., (1983), “**Competition between wear processes during the dry sliding of two copper alloys on 52100 steel**”, Wear of Materials Conference Proceedings, Publicado por American Society of Mechanical Engineers, EE.UU., pp. 526-533.
- BOAS, M. y ROSEN, A., (1977), “**Effect of load on the adhesive wear of steels**”, Wear, V. 44., pp. 213-222.
- BOWDEN, F. B. y TABOR, D., (1954-1964), “**The friction and lubrication of solids**”, Clarendon Press, V.2, Inglaterra.,
- CADENAS, P., (2000), “Evaluación del desgaste por deslizamiento del acero AISI 4340”, Trabajo de Ascenso, U.C.V.
- CZICHOS, H., (1976), “**A systems analysis data sheet for friction and wear test and outline for simulative testing**”, Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D. and Glaesser, W., (Editores), A.S.M., EEUU., pp. 22-39
- DAVIES, O.L., (1971), “**Design and Analysis of Industrial Experiments**”, Oliver and Boyd, Edinburgh.
- DE GEE, A. W., (1979), “**Friction and wear as related to the composition, structure and properties of metals**”, International Metals Reviews, V. 24., pp. 57-67.
- EYRE, T., (1978), “**Wear characteristics of metals**”, Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D. and Glaesser, W., (Editores), A.S.M., EEUU., pp. 1-10
- GLASCOTT, J.; STOTT, F. H. y WOOD, G. C., (1984), “**The transition from severe to mild sliding wear for Fe-12% Cr-base alloys at low temperatures**”, Wear, V. 97., pp. 155-178.
- GUERRERO, R. y ROJAS, M., (1984), “Evaluación de las propiedades del desgaste del acero de fabricación nacional AISI 4340: Efectos de la dureza”, Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, U.C.V.
- HALLING, J., (1983), “**Toward a mechanical wear equation**”, Journal of Lubrication Technology, V. 105., pp. 201-220.
- HIRST, W. y LANCASTER, J.K., (1956), “**Surface film foundation and metallic wear**”, Journal of Applied Physics, V.27.
- HIRST, W., (1957-1958), “**Wear of unlubricated metals**”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference on Lubrication and Wear, Londres., Artículo 66, pp. 674-681.

- HIRST, W., (1967–1968), **“Basic mechanisms of wear”**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, V. 182., pp. 281-292.
- HWANG, D., SUNG, I., KIM, D. Y LEE, S., (1999), **“Effects of materials pair properties on the frictional behavior of metals”**, Wear 225-229.
- IRURETA, R.; NATERA, M. y ZUCCARINNI, G., (1981), “Estudio del comportamiento al desgaste de aceros especiales fabricados en Venezuela”, Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Mecánica, U.C.V.
- IWAI, Y. y KICHIRO, E., (1982), **“Transition of the lubricated wear of carbon steel”**, Wear, V. 75., pp. 159-172.
- JAHANMIR, S., (1981–1982), **“Wear of AISI 4340 steel under boundary lubrication”**, Wear V. 74., pp. 51-65.
- JOHNSON, R.L.; SWIKERT, M.A. y BISSON, E.E., (1948), **“Friction at high sliding velocities of surfaces lubricated with sulfur as an additive”**, NACA TN 1720.
- KASAK, A. y NEUMEYER, T. A., (1969), **“Observations on wear of high–hardness steels”**, Wear, V. 14. , pp. 445-454.
- KENNARD, R.W., (1978), **“Engineering Statistics and Quality Control”**, Mark’s Standard Handbook for Mechanical Engineers, McGraw-Hill.
- KIMURA, Y., (1981), **“The role of fatigue in sliding wear”**, Fundamentals of Friction and Wear of Materials, Rigney, D. A. (Ed.), A.S.M. , pp. 187-219.
- KLAMECKI, B. E., (1980), **“Wear – An entropy production model”**, Wear, V. 58. , pp. 325-330.
- KRAGELSKII, I.V. y ALISIN, V.V., (1981), **“Calculation of wear rate”**, Tribology Handbook”, Ed. Mir Publishers, V.2, Moscú.
- KRAGELSKII, I.V., (1981), **“Friction Wear Lubrication”**, Tribology Handbook, Editorial Mir Publishers, V.1, Moscú.
- KRAGELSKII, I. V. y MARCHENKO, E. A., (1981), **“Wear of machine components”**, Journal of Lubrication Technology, V. 104. , pp. 1-7.
- KUHLMAN–WILSDORF, D., (1981), **“Dislocation concepts in friction and wear”**, Fundamentals of friction and wear of materials, Rigney, D. A. (Ed.), A.S.M. , pp. 119-186.
- LEACH, P. W., (1984), **“Prow formation in the wear of cast iron”**, Wear, V. 96. , pp. 135-142.

- LIPSON, CH., (1967), “**Wear considerations in design**”, Prentice Hall, EE.UU.
- MOORE, M. A., (1974), “ **A review of two-body abrasive wear**”, Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D. A. and Glaeser, W. A. (Editores.), A.S.M., EE.UU. , pp. 70-77.
- MOORE, M. A., (1981), “ **Abrasive wear**”, Fundamentals of Friction and Wear of Materials, Rigney, D. A. (Ed.), A.S.M., EE.UU. , pp. 73-118.
- NIEMANN, G., (1973), Tratado teórico practico de elementos de máquinas, calculo, diseño y construcción, Editorial Labor S.A.
- OBERLE, T. L., (1951), “**Properties influencing wear of metals**”, Journal of metals, V. 3. , pp. 438-439G.
- PETERSON, M. B., (1976), “**Wear Testing Objectives and Approaches**”, Selection and Use of Wear Test for Metals, Bayer, R.G., (Editores), American Society for Testing and Materials.
- QUINN, T. F. J.; ROWSON, D. M. y SULLIVAN, J. L., (1980), “**Applications of the oxidational theory of mild wear to the sliding wear of low-alloys steel**”, Wear, V. 65. , pp. 1-20.
- QUINN, T. F. J. y WINNER, W. O., (1985), “**The thermal aspects of oxidational wear**”, Wear, V. 102. , pp. 67-80.
- RABINOWICZ, E., (1965), “**Friction and wear of materials**”, Copyright by Jhon Wiley and Sons, Inc, Printed in EEUU.
- RABINOWICZ, E., (1981), “**The wear coefficient–magnitude, scatter, uses**”, Journal of Lubrication Technology, V. 103. , pp. 188-194.
- RIGNEY, D. A., (1981), “**Fundamentals of friction and wear of materials**”, ASM Rigney, D. and Glaeser, W., (Editores), A.S.M., EEUU. , pp. 1-12.
- ROSENFELD, A., (1981), “**A dislocation theory approach to wear**”, Wear, V. 72. , pp. 97-103.
- ROSENFELD, A., (1981), “**Elastic–Plastic mechanics and wear**”, Wear, V. 72. , pp. 245-254.
- ROSENFELD, A., (1981), “**Wear and fracture mechanics**”, Fundamentals of friction and wear of materials, Rigney, D. A. (Ed.), A. S. M. , pp. 221-234.

- ROTHBART, H., (1964), **“Mechanical Designs and Systems Handbook”**, Editorial McGraw Hill, INC.
- RUFF, A. W.; IVES, L. K. y GLAESER, W. A., (1981), **“Characterization of wear surfaces and wear debris”**, Fundamentals of Friction and Wear of Materials, Rigney, D. A. (Ed.), A. S. M. , pp. 235-289.
- RUZZANTE, J.; ALVAREZ, P.; HEY, A.; GESTIDO, G. D.; VOSEN, J. y FERNÁNDEZ, H., (1985), **“Comportamiento al desgaste de acero inoxidable AISI 304”**, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.
- SAMUELS, L. E.; DOYLE, E. D. y TURLEY, D. M., (1981), **“Sliding wear mechanisms”**, Fundamentals of friction and wear of materials, Rigney, D. A. (Ed.), A.S.M. , pp. 13-41.
- SCHUMACHER, W., (1978), **“Wear compatibility of unlubricated stainless steel and other metal couples”**, Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D. A. y Glaeser, W. A. (Ed.), A.S.M., EE.UU. , pp. 170-175.
- SLESKY, W. J. Y THOMAS, G., (1982), **“Medium carbon steel alloy design for wear applications”**, Wear, V. 75. , pp. 21-40.
- SOOM, A. y KIM, C., (1983), **“Interaction between dynamic, normal and frictional forces during unlubricated sliding”**, Journal of Lubrication Technology, V. 105. , pp. 183-202.
- SUH, N., (1973), **“The delamination theory of wear”**, Wear, V. 25. , pp. 111-124.
- SUH, N. Y Y SIN, H., (1980), **“The genesis of friction”**, Wear, V. 69.
- TABOR, D., (1973), **“Friction mechanisms, effect of lubricants”**, Tribology Handbook, Neale, M. J. (Ed.), Butterworth and Co. Publishers Sección F3.
- TABOR, D., (1977), **“Wear – A critical Synoptic view”**, Journal of Lubrication Technology, V. 99. , pp. 387-394.
- UNTERWEISER, P. M., (1978), **“Preface al Source Book on Wear Control Technology”**, Rigney, D. A. y Glaeser, W.A. (Ed.), American Society for Metals, EE.UU. , pp. v-vi.
- VÁZQUEZ, J. C., (1986), **“El desgaste de los aceros nacionales AISI 1045, 1060, 4140, y 4340; bajo condiciones de deslizamiento sin lubricación: Efectos de la dureza y de la carga normal”**, Trabajo de Ascenso, U.C.V.
- VINGSBO, O. y HOGMARK, S., (1981), **“Wear of steels”**, Fundamentals of friction and wear of materials, Rigney, D. A. (Ed.), A.S.M. , pp. 373-408.

- WANG, Y., LEI, T. Y LIU, J., (1999), “**Tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding**”, I, II y III, Wear 231.
- WELSH, N. C., (1957), “**Frictional heating and its influence on the wear of steel**”, Journal of Applied Physics, V. 28. , pp. 960-968.
- WELSH, N. C., (1957), “**Structural changes in rubbed steel surfaces**”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference on Lubrication and Wear, Londres. , pp. 701-706.
- WELSH, N. C., (1965), “**The dry wear of steel**”, Philosophical Transaction of Royal Society, V.257. , pp. 31-70.
- WRIGHT, K. H. R., (1973), ” **Mechanisms of wear**”, Tribology Handbook, Neale, M. J. (Ed.), Butterworth and Co. Publishers Sección F6.
- YOUNG, W. C., (1989), “**Roark’s Formulas for Stress and Strain**”, 6<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill Book Company.

## **ANEXOS**

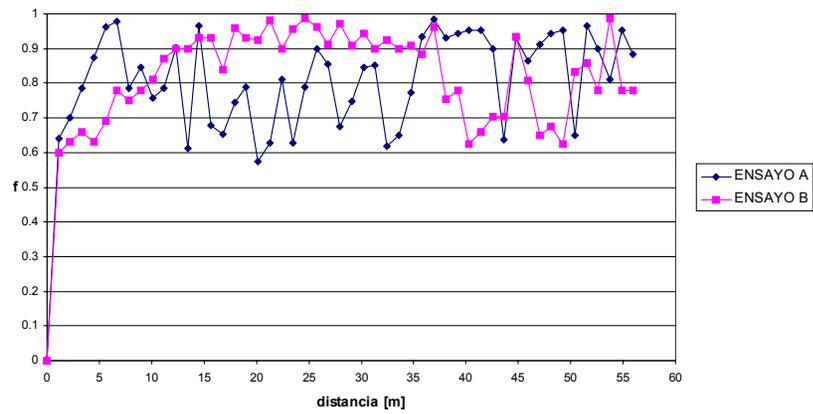
## **ANEXOS A**

### **GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCIÓN VS. DISTANCIA PARA VALORES DE CARGA APLICADA CONSTANTE**

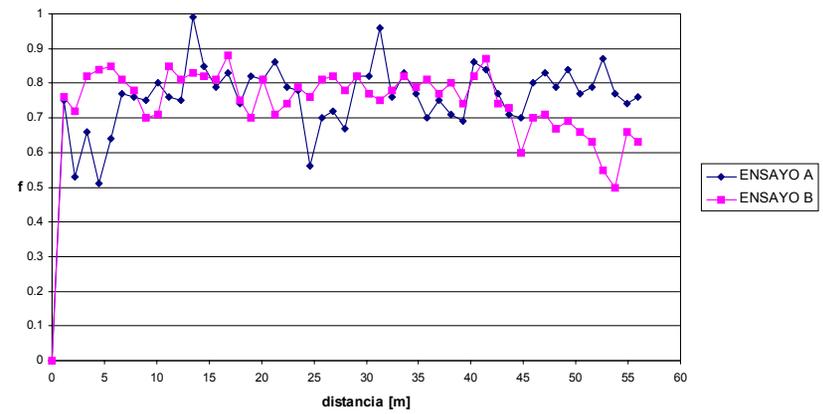
# ANEXO A-1

## Coeficiente de Fricción vs Distancia Carga = 44.5 N

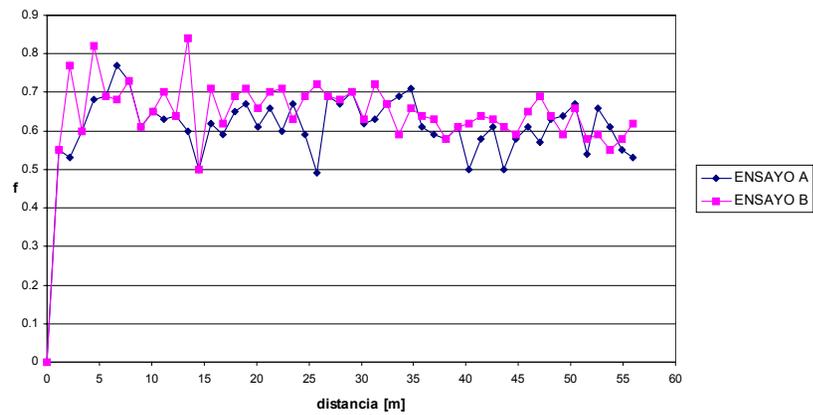
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 44.5N y 0.1m/s



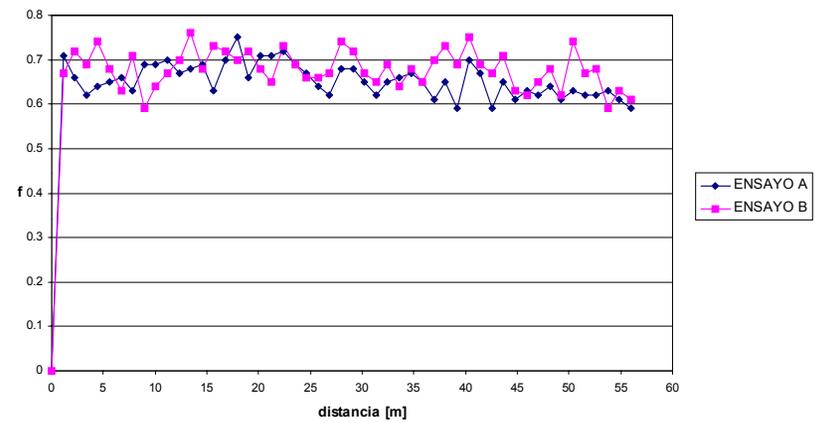
Coeficiente de Fricción vs. Distancia para 44.5N y 0.2m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 44.5 N y 0.4 m/s



Coeficiente de Fricción vs. Distancia para 44.5N y 0.6 m/s

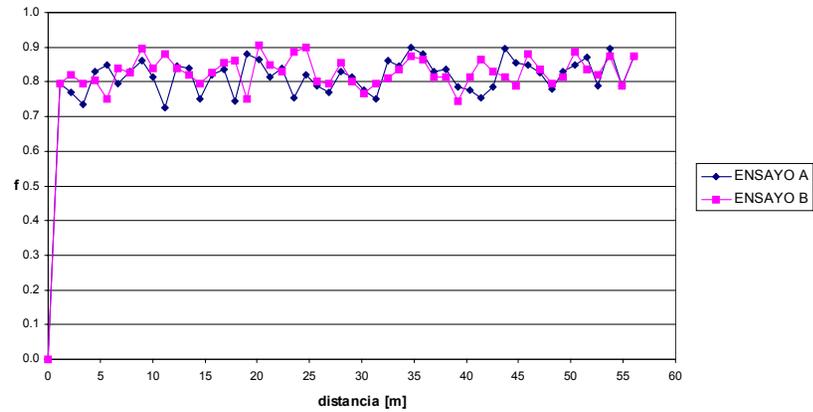


## ANEXO A-2

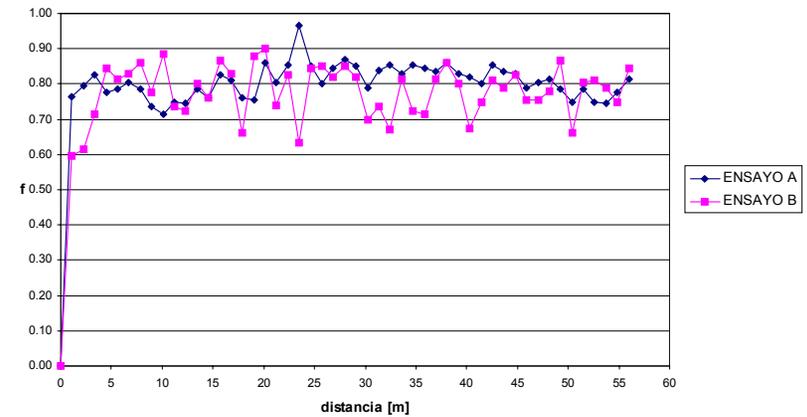
### Coeficiente de Fricción vs Distancia

**Carga = 89 N**

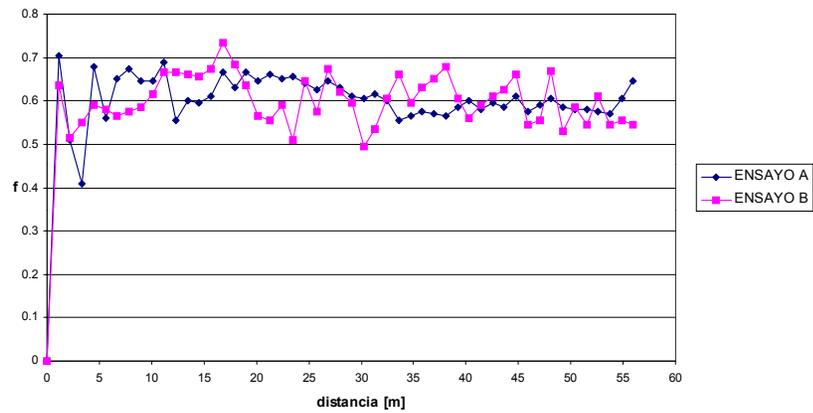
Coeficiente de Fricción vs. Distancia para 89 N y 0.1 m/s



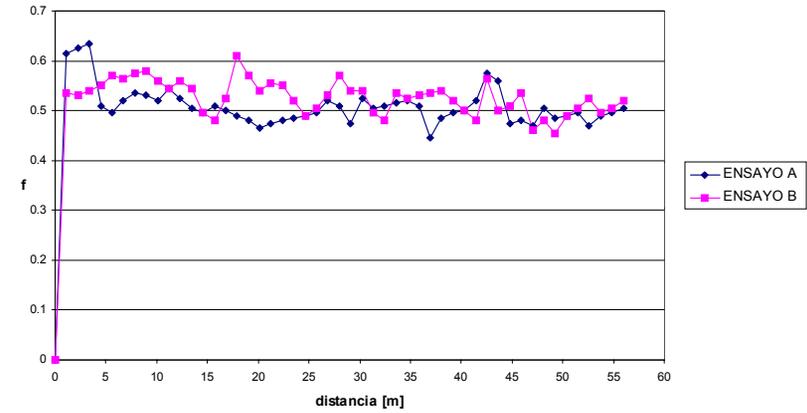
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 89 N y 0.2 m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 89 N y 0.4 m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 89 N y 0.6 m/s

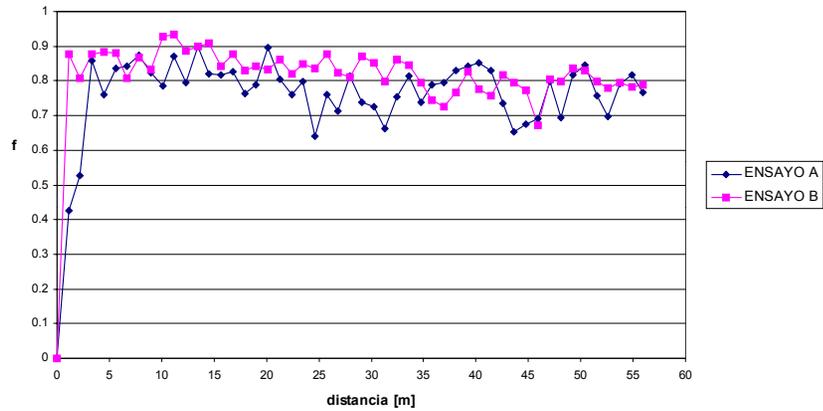


### ANEXO A-3

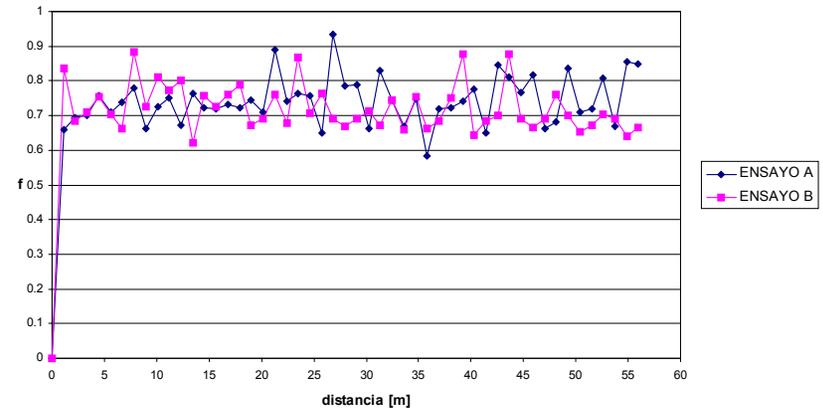
#### Coefficiente de Fricción vs Distancia

Carga = 133.5 N

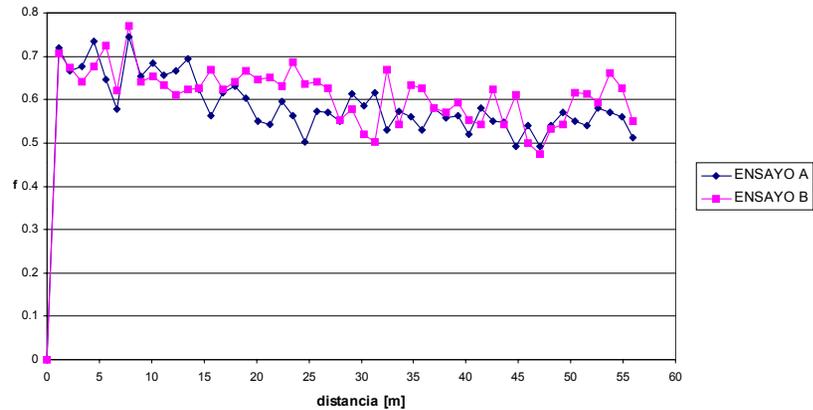
Coefficiente de Fricción vs Distancia para 133.5N y 0.1m/s



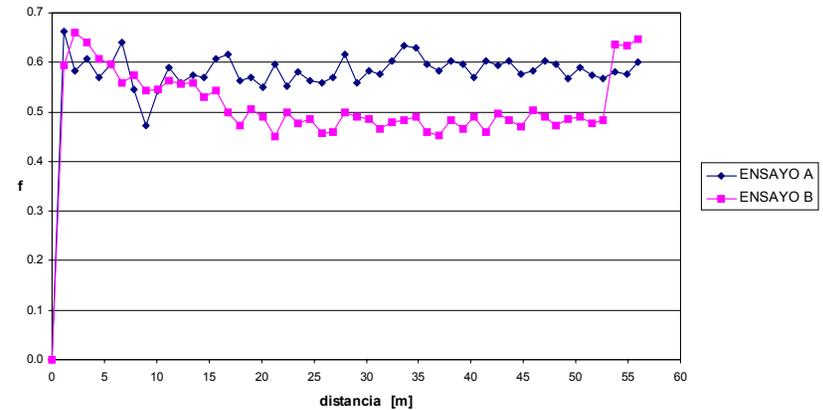
Coefficiente de Fricción vs Distancia para 133,5 N y 0,2 m/s



Coefficiente de Fricción vs Distancia para 133,5 N y 0,4 m/s



Coefficiente de Fricción vs Distancia para 133.5N y 0.6m/s

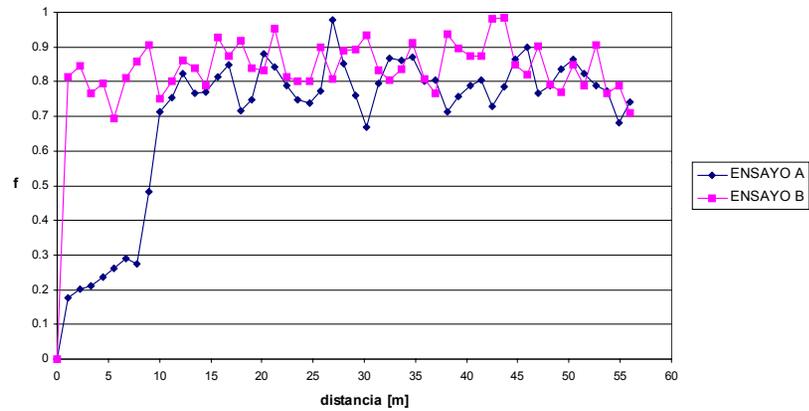


## ANEXO A-4

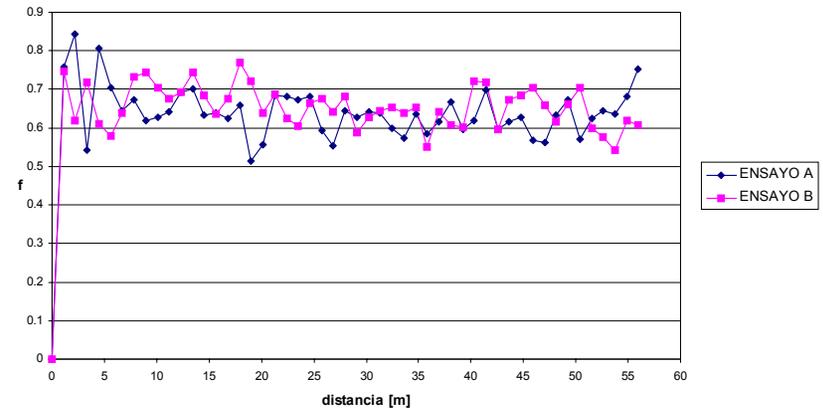
### Coeficiente de Fricción vs Distancia

#### Carga = 178 N

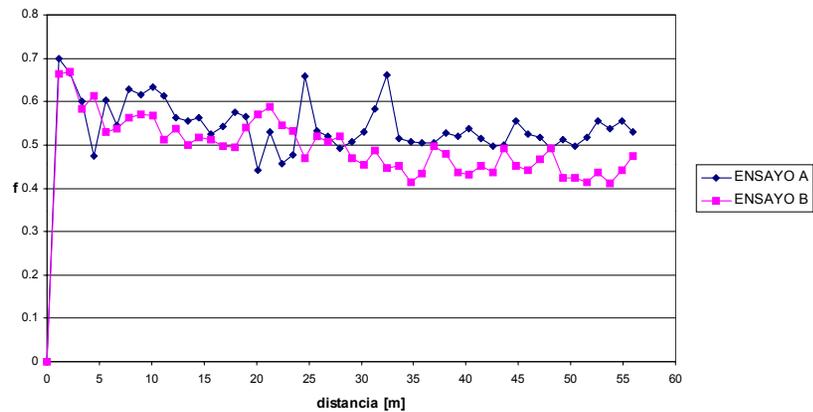
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 178N y 0.1 m/s



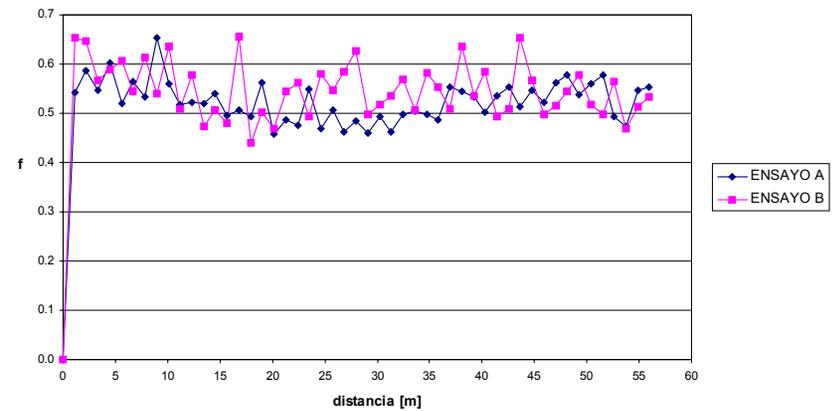
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 178N y 0.2 m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 178 N y 0.4 m/s



Coeficiente de fricción vs Distancia para 178N y 0.6m/s



## **ANEXOS B**

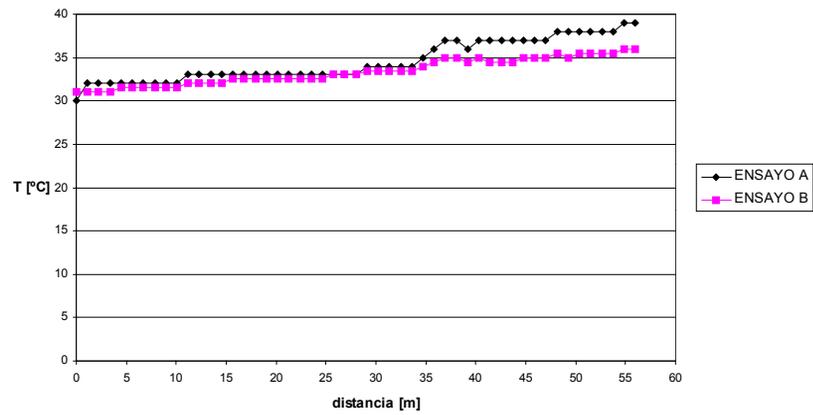
### **GRAFICAS TEMPERATURA VS. DISTANCIA PARA VALORES DE CARGA APLICADA CONSTANTE**

# ANEXO B-1

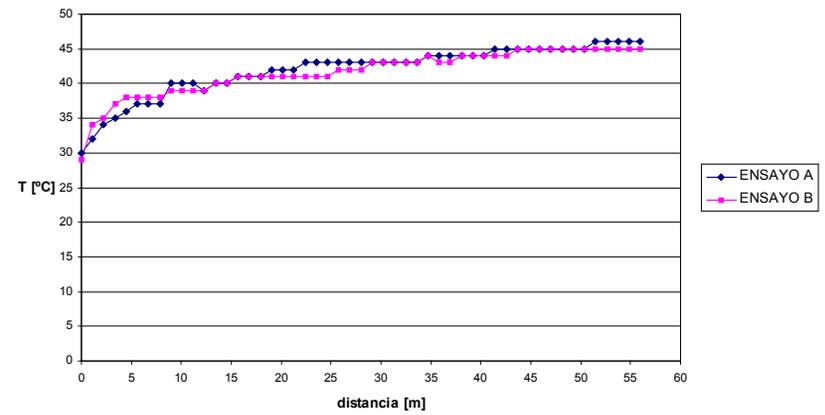
## Temperatura vs Distancia

### Carga = 44.5 N

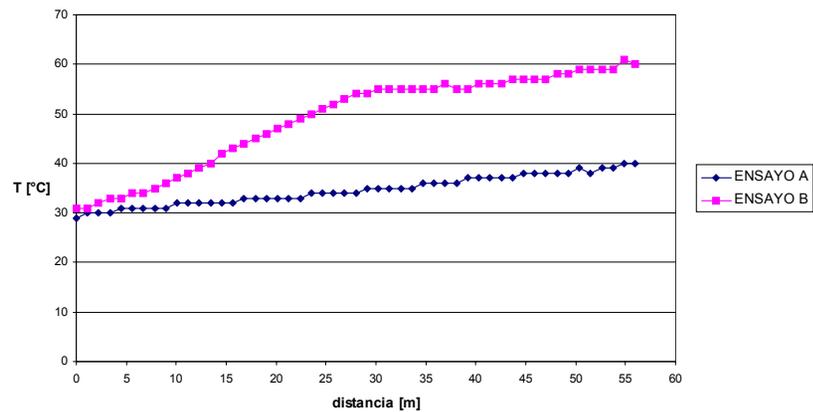
Temperatura vs distancia para 44.5 N y 0.1 m/s



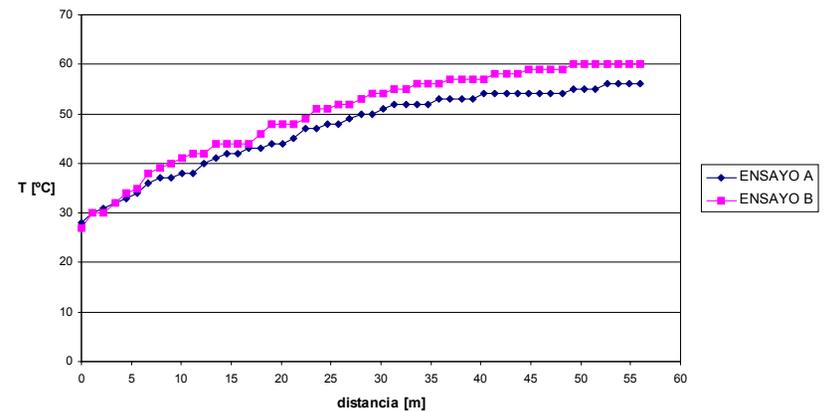
Temperatura vs Distancia para 44.5N y 0,2 m/s



Temperatura vs Distancia para 44.5N y 0.4m/s



Temperatura vs. Distancia para 44.5 N y 0.6 m/s

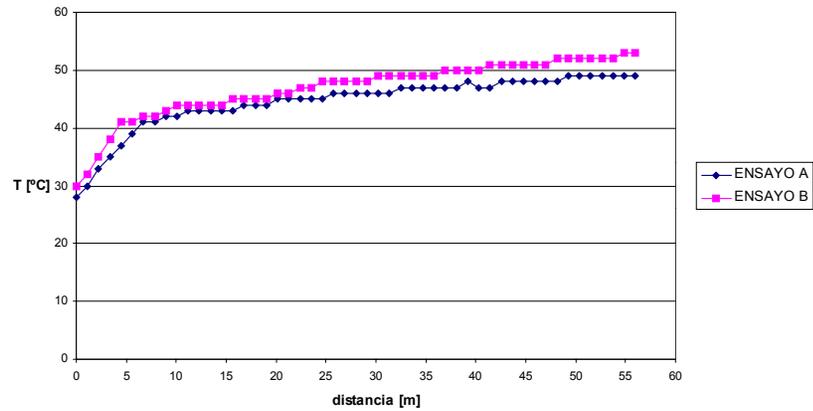


## ANEXO B-2

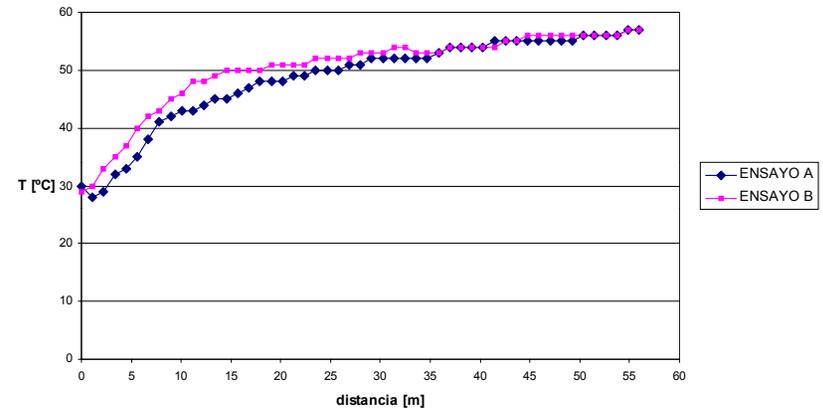
### Temperatura vs Distancia

#### Carga = 89 N

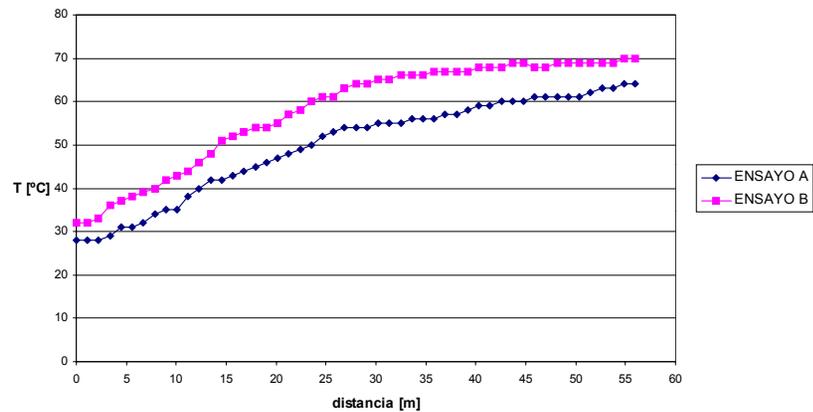
Temperatura vs Distancia para 89 N y 0.1 m/s



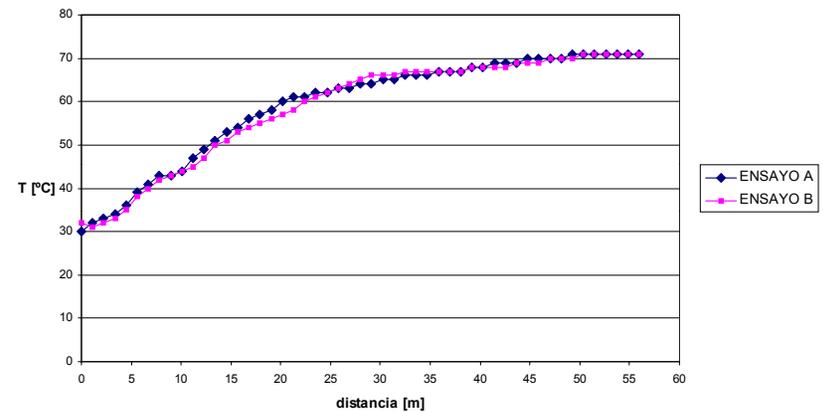
Temperatura vs Distancia para 89N y 0.2 m/s



Temperatura vs. Distancia para 89N y 0.4 m/s



Temperatura vs. Distancia a 89 N y 0.6 m/s

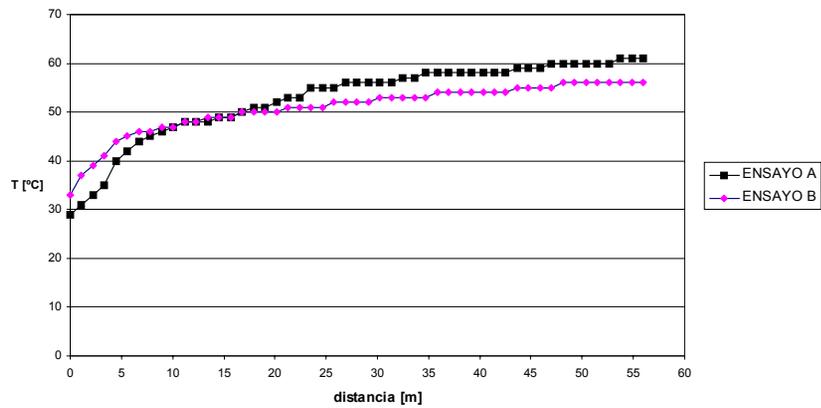


## ANEXO B-3

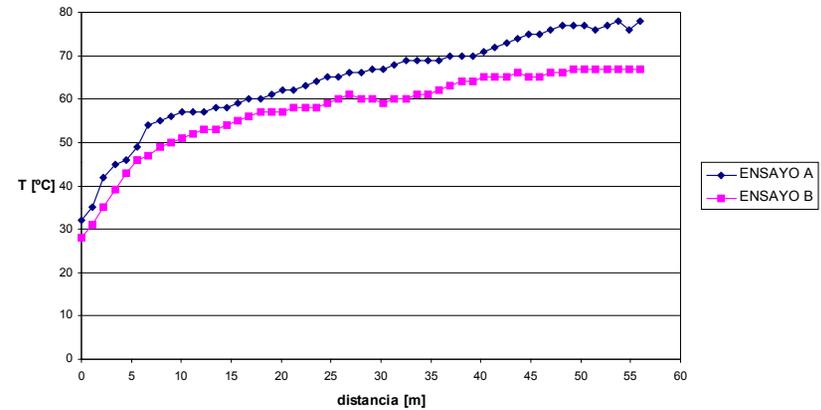
### Temperatura vs Distancia

#### Carga = 133.5 N

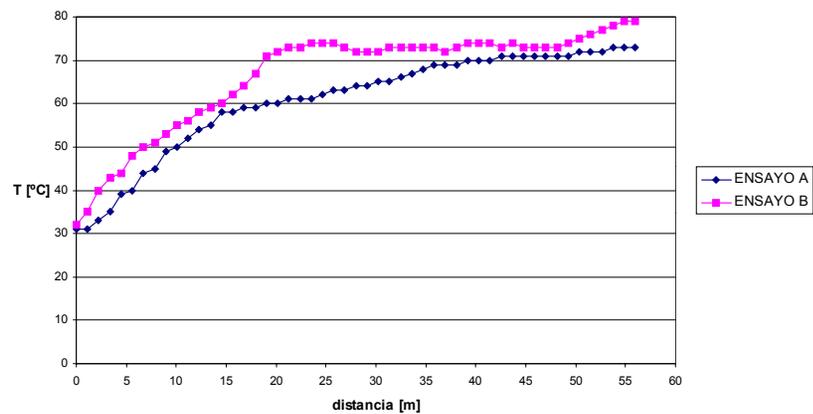
Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.1 m/s



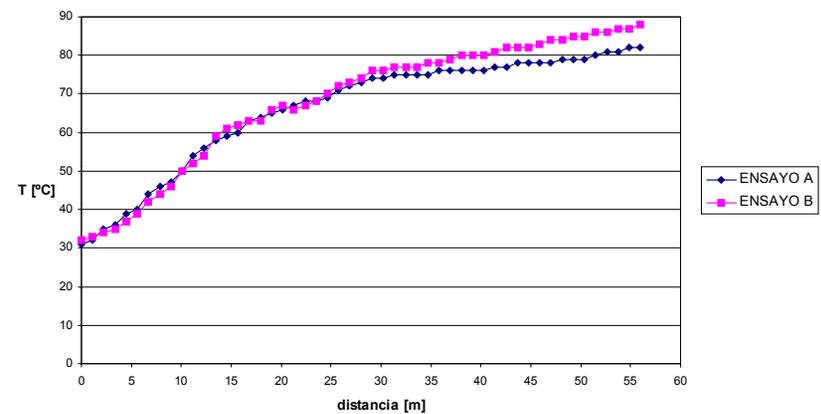
Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.2 m/s



Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.4 m/s

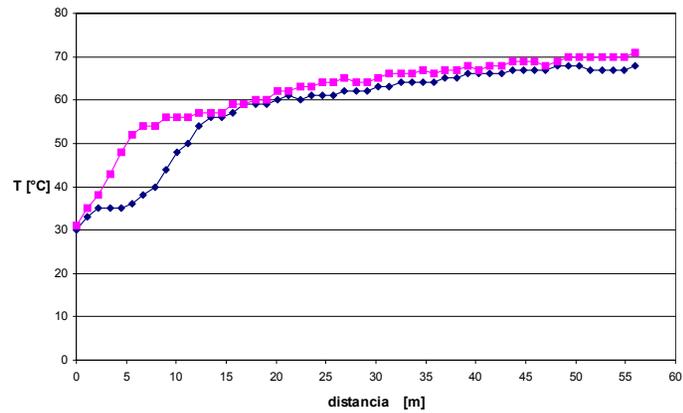


Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.6 m/s

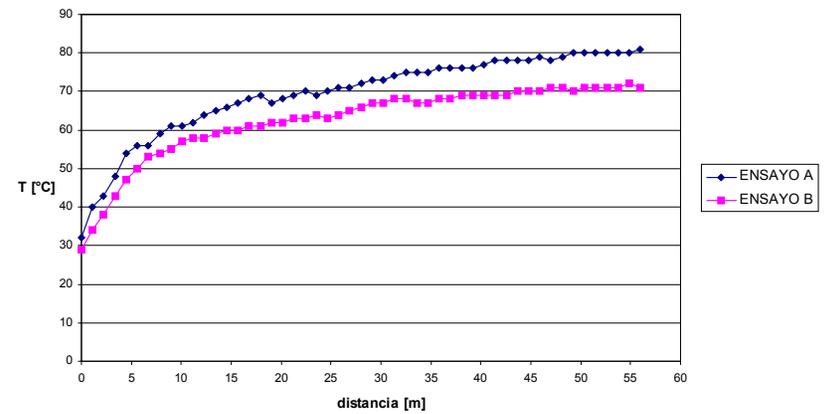


## ANEXO B-4 Temperatura vs Distancia Carga = 178 N

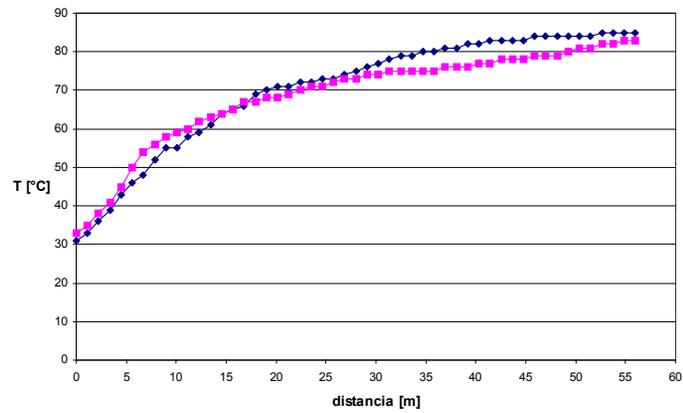
Temperatura vs Distancia para 178 N y 0.1 m/s



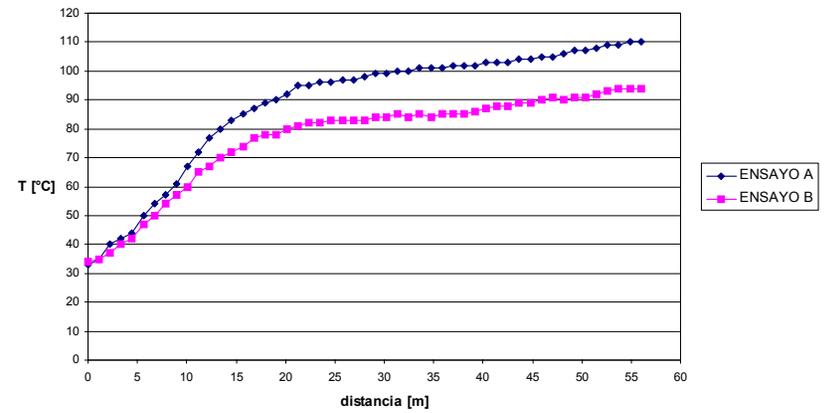
Temperatura vs Distancia para 178 N y 0.2 m/s



Temperatura vs. Distancia para 178 N y 0.4 m/s



Temperatura vs. Distancia para 178 N y 0.6 m/s



**ANEXOS C**

**GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCIÓN VS. DISTANCIA**

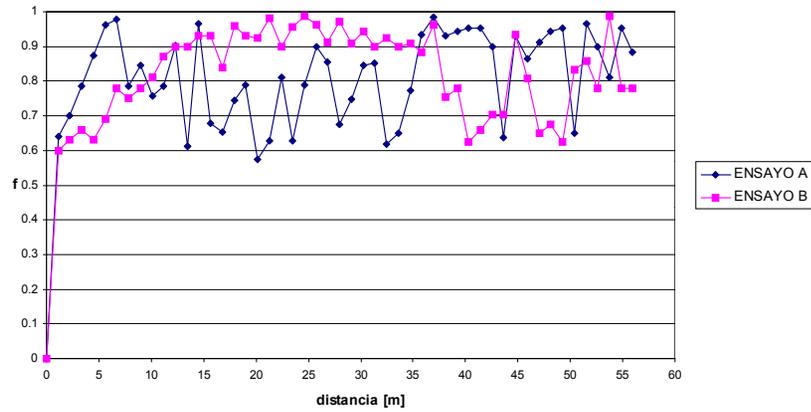
**PARA VALORES DE VELOCIDAD CONSTANTE**

# ANEXO C-1

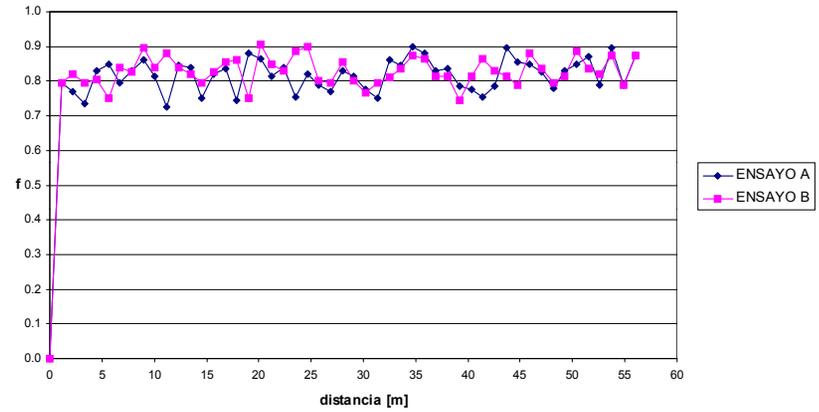
## Coeficiente de Fricción vs Distancia

### Velocidad = 0.1m/s

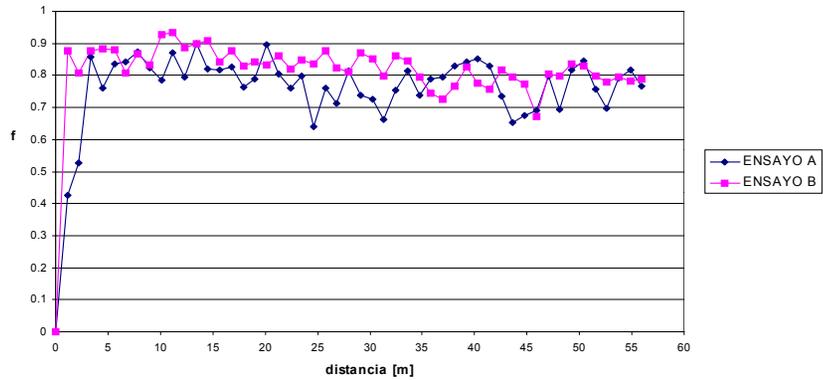
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 44.5N y 0.1m/s



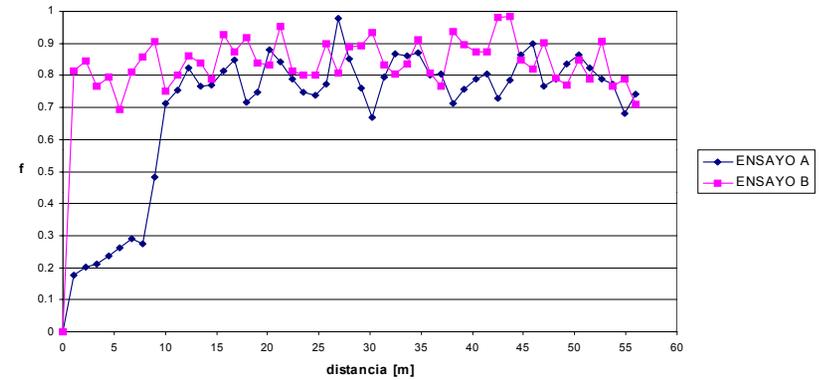
Coeficiente de Fricción vs. Distancia para 89 N y 0.1 m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 133.5N y 0.1m/s



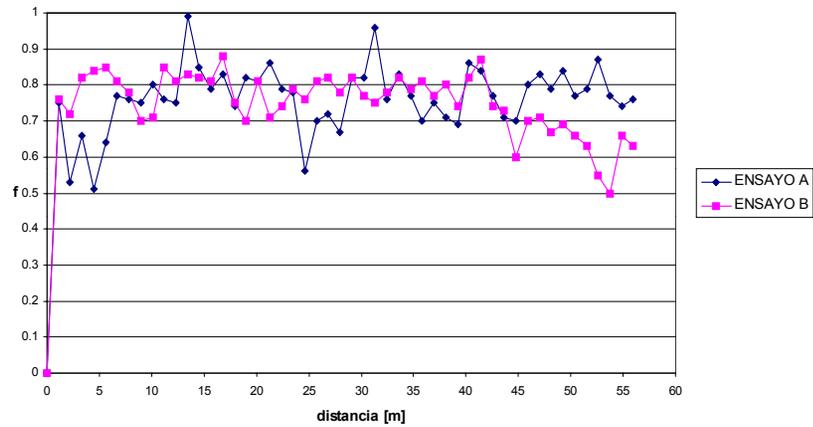
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 178N y 0.1 m/s



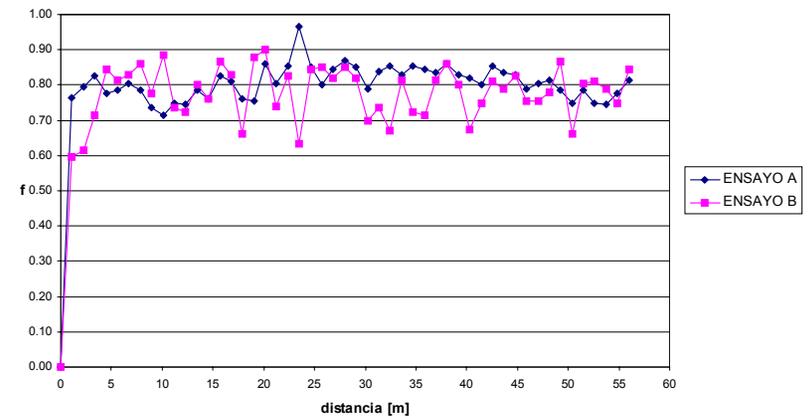
## ANEXO C-2

### Coeficiente de Fricción vs Distancia Velocidad = 0.2m/s

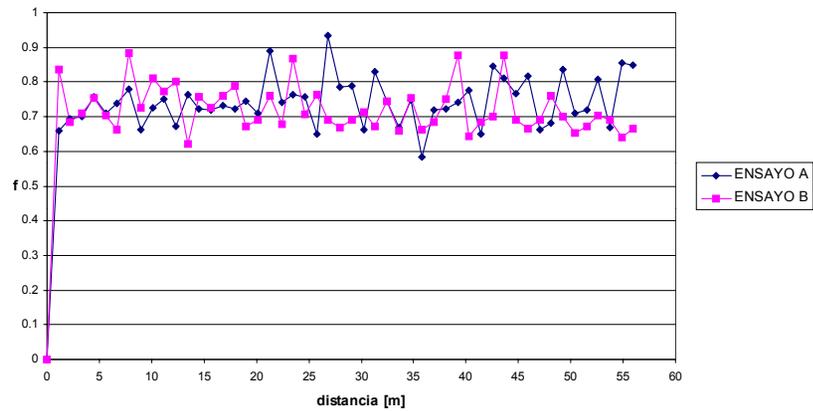
Coeficiente de Fricción vs. Distancia para 44.5N y 0.2m/s



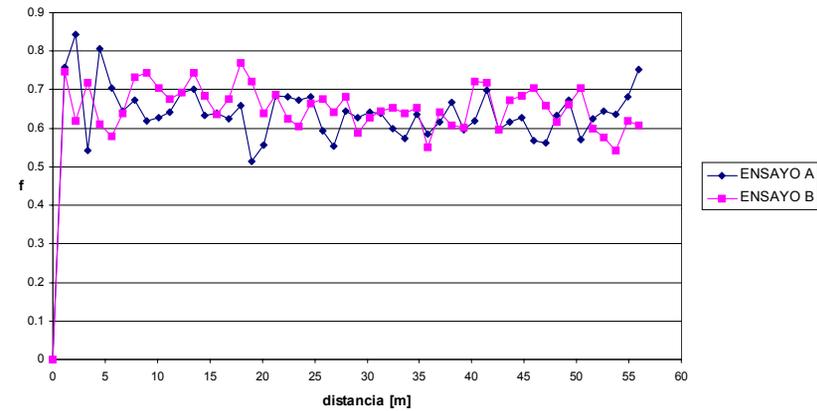
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 89 N y 0.2 m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 133,5 N y 0,2 m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 178N y 0.2 m/s

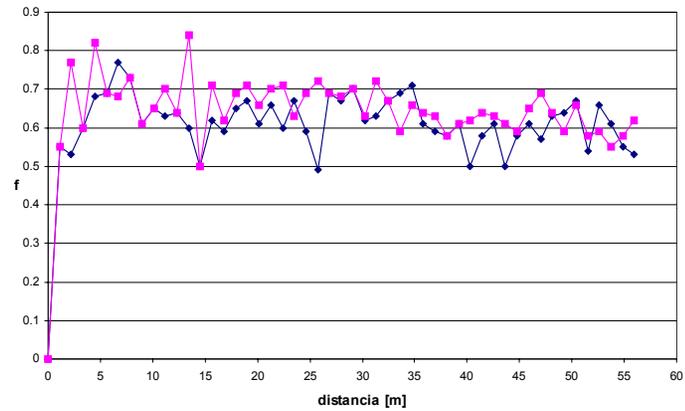


### ANEXO C-3

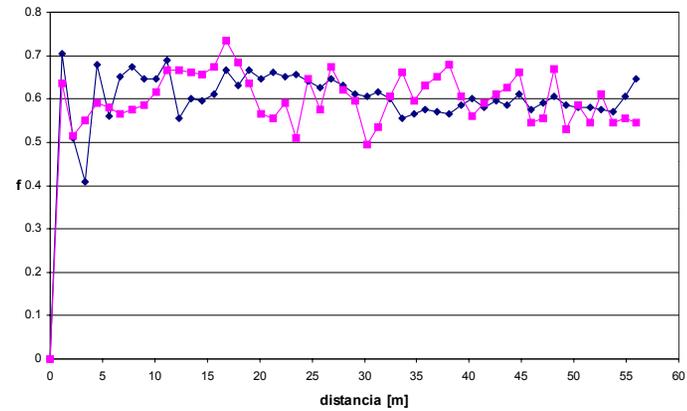
#### Coefficiente de Fricción vs Distancia

Velocidad = 0.4m/s

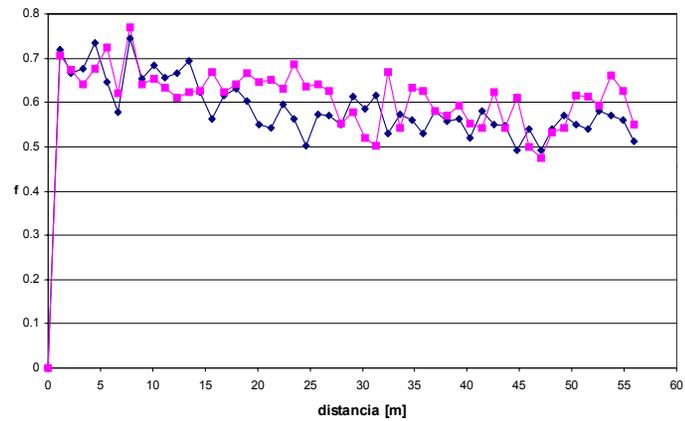
Coefficiente de Fricción vs Distancia para 44.5 N y 0.4 m/s



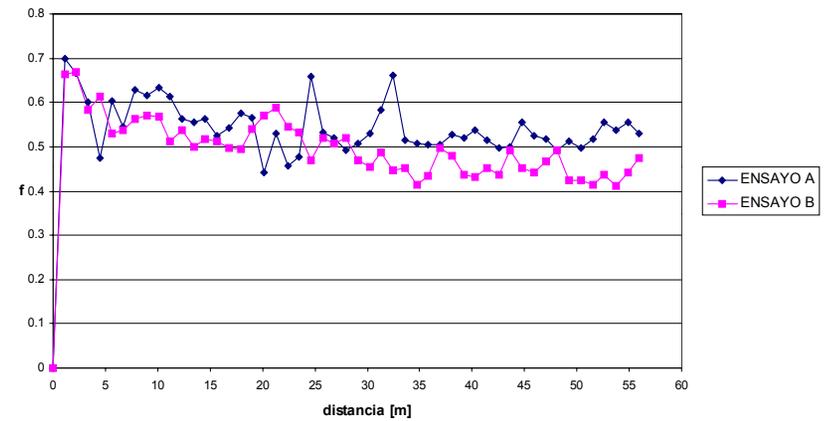
Coefficiente de Fricción vs Distancia para 89 N y 0.4 m/s



Coefficiente de Fricción vs Distancia para 133,5 N y 0,4 m/s



Coefficiente de Fricción vs Distancia para 178 N y 0.4 m/s

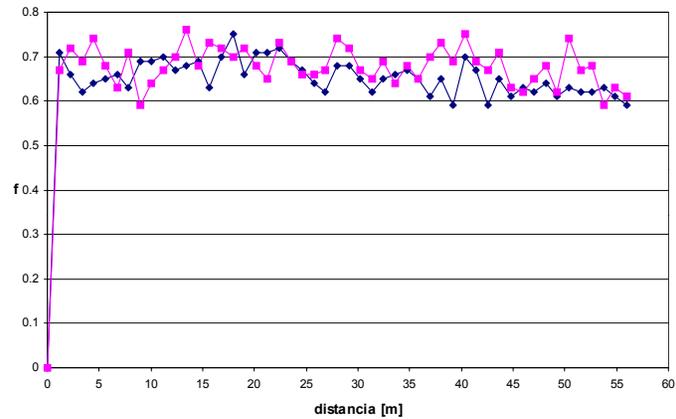


## ANEXO C-4

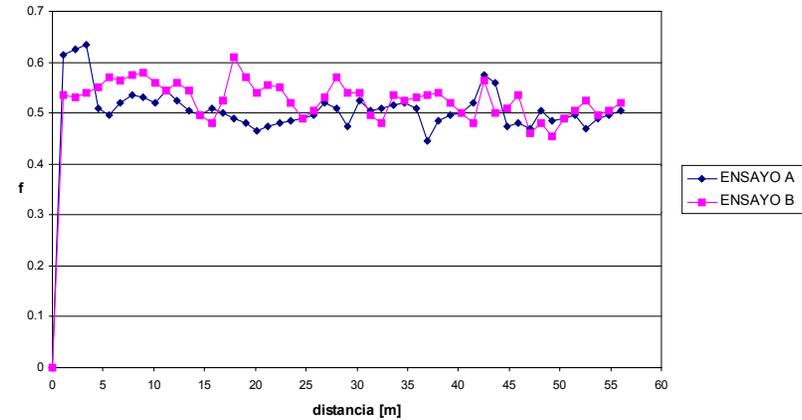
### Coeficiente de Fricción vs Distancia

Velocidad = 0.6m/s

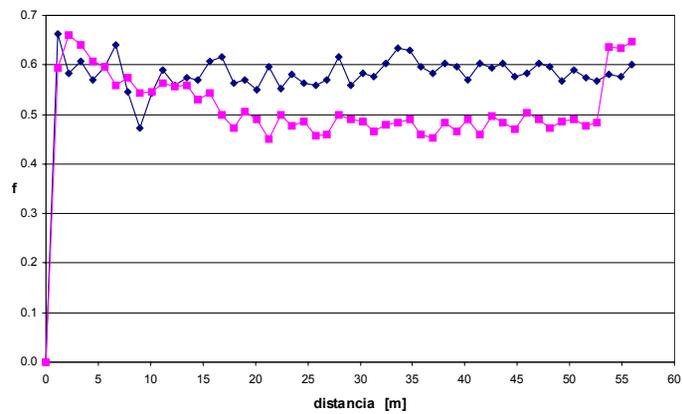
Coeficiente de Fricción vs. Distancia para 44.5N y 0.6 m/s



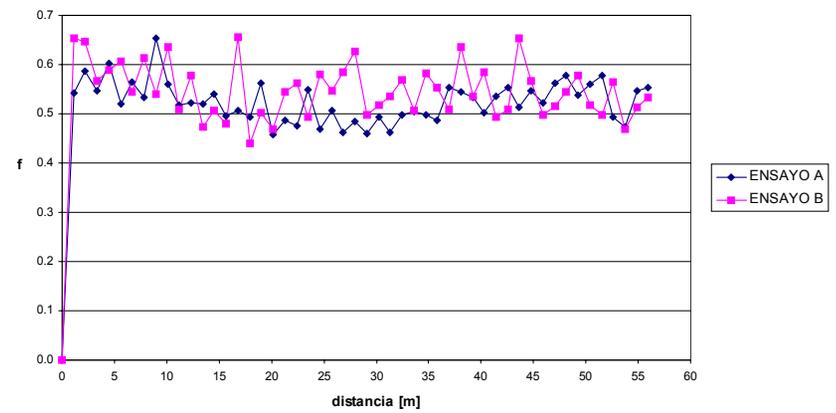
Coeficiente de Fricción vs Distancia para 89 N y 0.6 m/s



Coeficiente de Fricción vs Distancia para 133.5N y 0.6m/s



Coeficiente de fricción vs Distancia para 178N y 0.6m/s



**ANEXOS D**

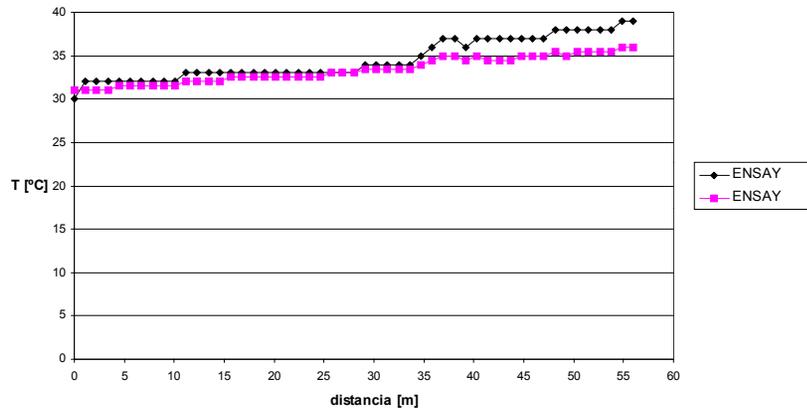
**GRAFICAS TEMPERATURA VS. DISTANCIA PARA VALORES  
DE VELOCIDAD CONSTANTE**

# ANEXO D-1

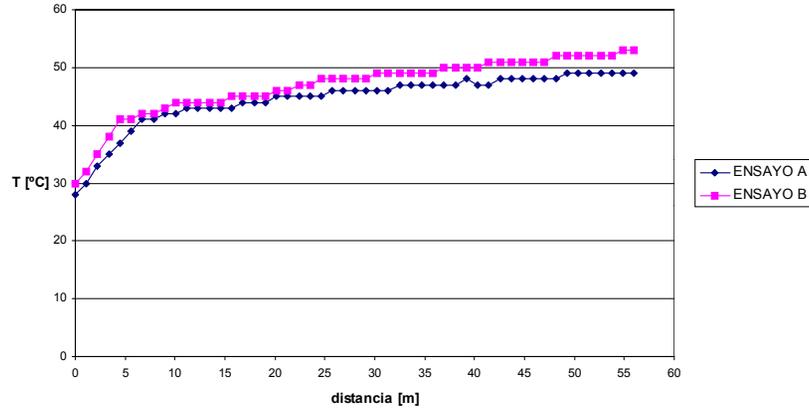
## Temperatura vs Distancia

### Velocidad = 0.1m/s

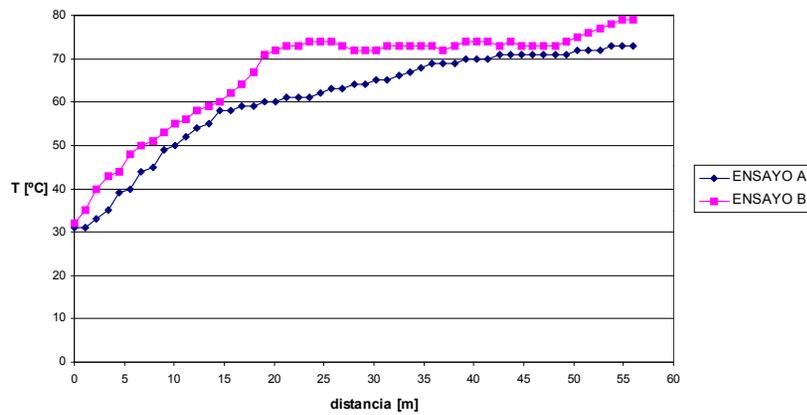
Temperatura vs distancia para 44.5 N y 0.1 m/s



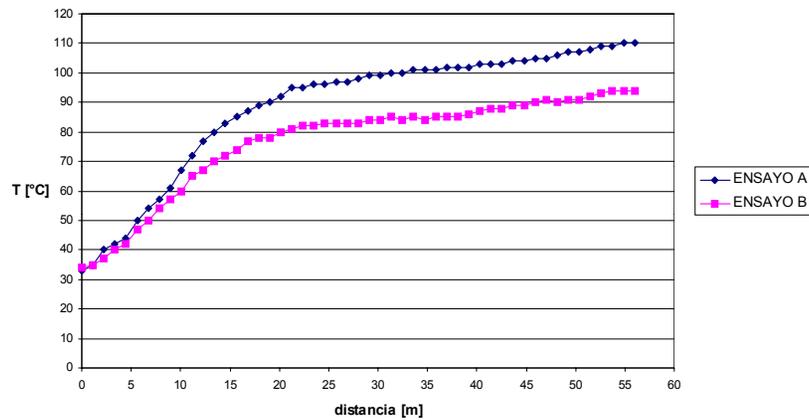
Temperatura vs Distancia para 89 N y 0.1 m/s



Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.4 m/s



Temperatura vs. Distancia para 178 N y 0.6 m/s

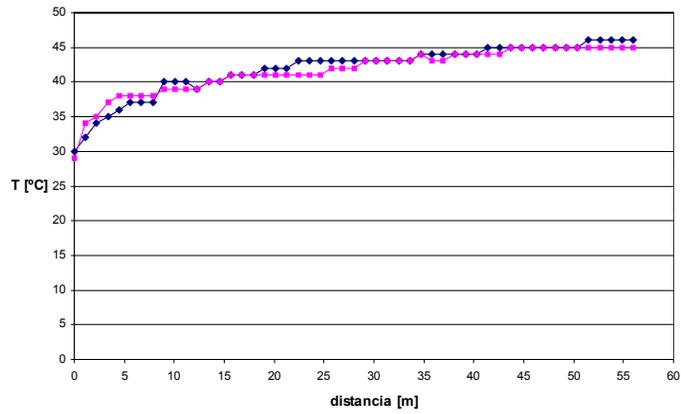


## ANEXO D-2

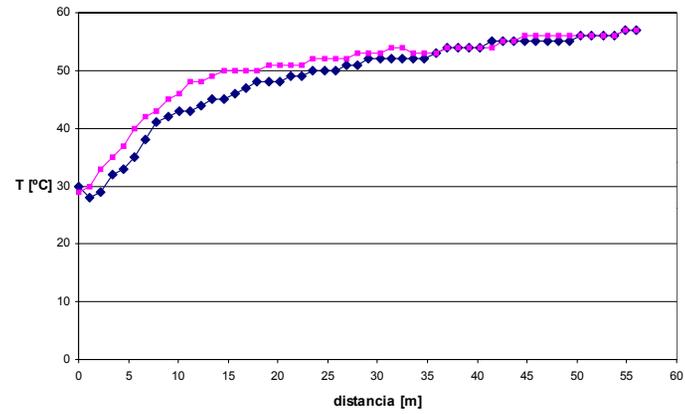
### Temperatura vs Distancia

Velocidad = 0.2m/s

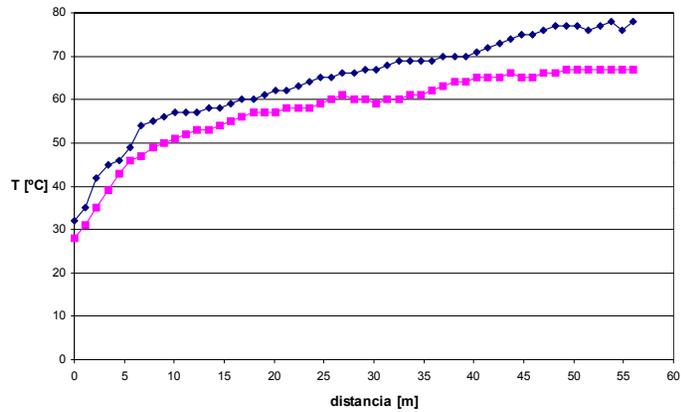
Temperatura vs Distancia para 44.5N y 0,2 m/s



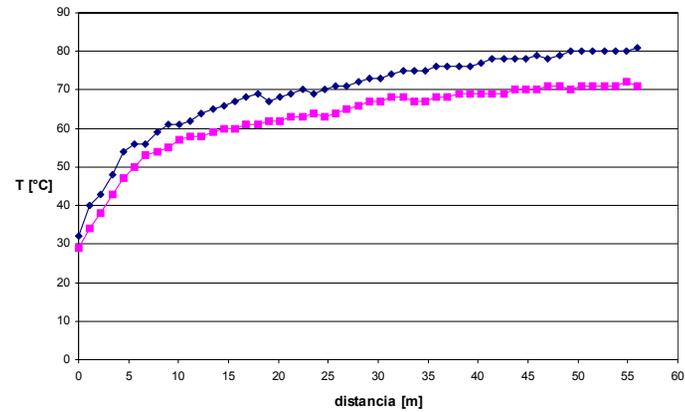
Temperatura vs Distancia para 89N y 0.2 m/s



Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.2 m/s



Temperatura vs Distancia para 178 N y 0.2 m/s

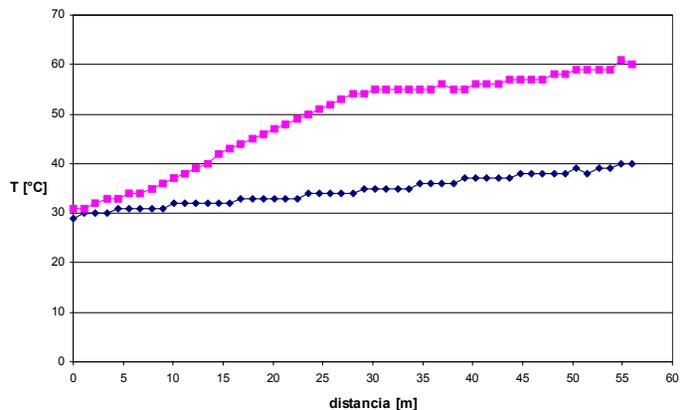


## ANEXO D-3

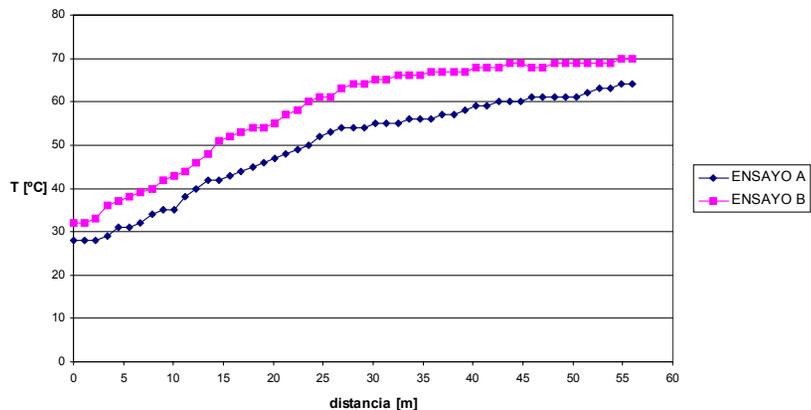
### Temperatura vs Distancia

**Velocidad = 0.4m/s**

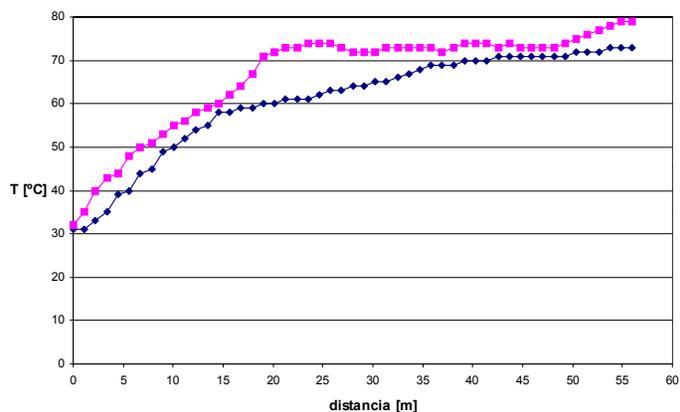
Temperatura vs Distancia para 44.5N y 0.4m/s



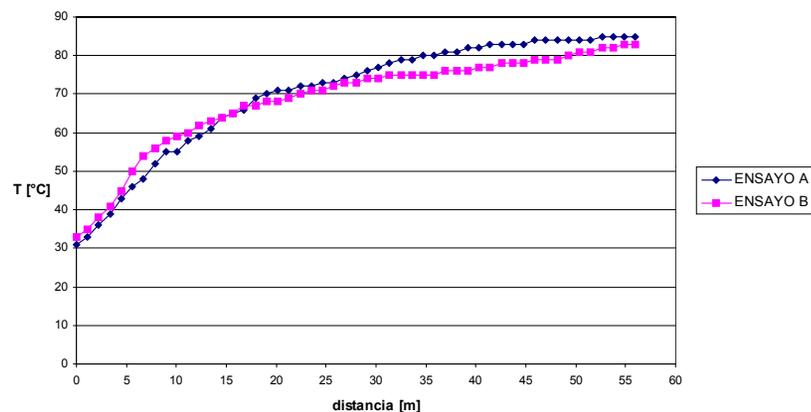
Temperatura vs. Distancia para 89N y 0.4 m/s



Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.4 m/s



Temperatura vs. Distancia para 178 N y 0.4 m/s

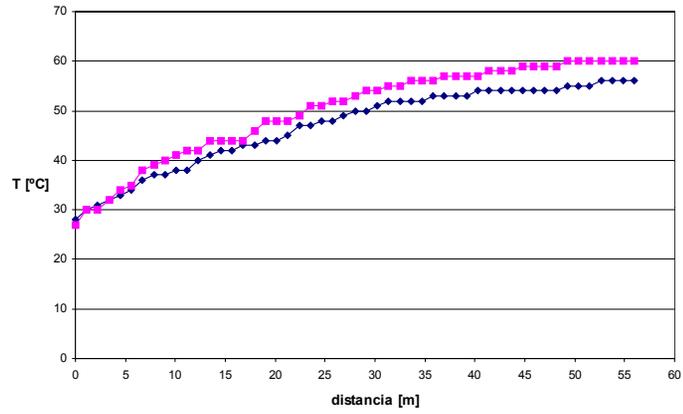


# ANEXO D-4

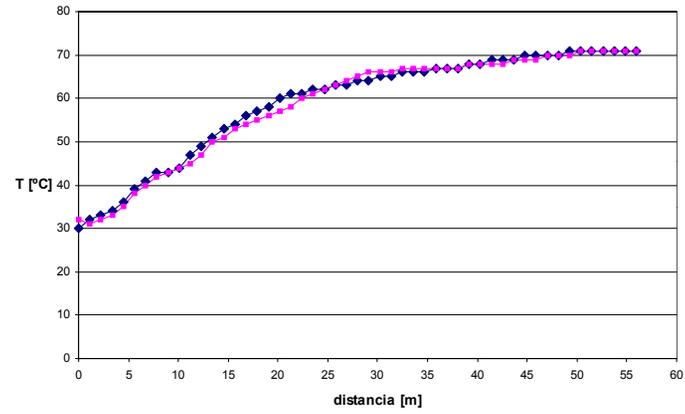
## Temperatura vs Distancia

### Velocidad = 0.6m/s

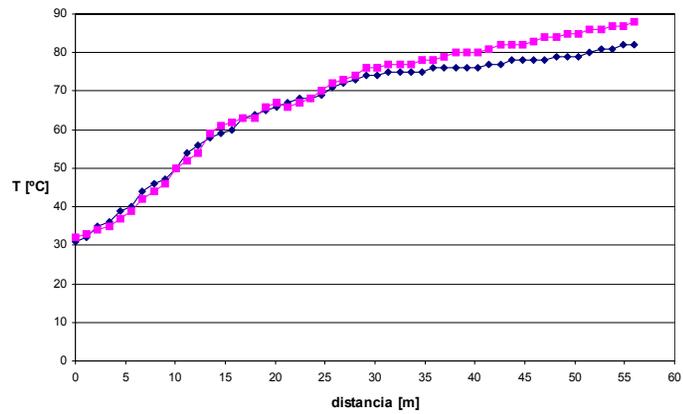
Temperatura vs. Distancia para 44.5 N y 0.6 m/s



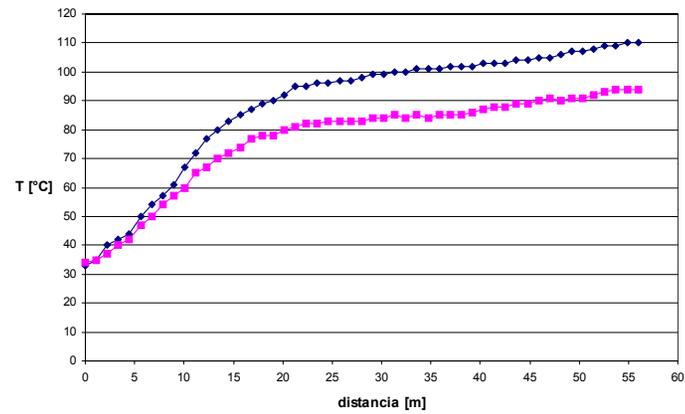
Temperatura vs. Distancia a 89 N y 0.6 m/s



Temperatura vs Distancia para 133.5 N y 0.6 m/s



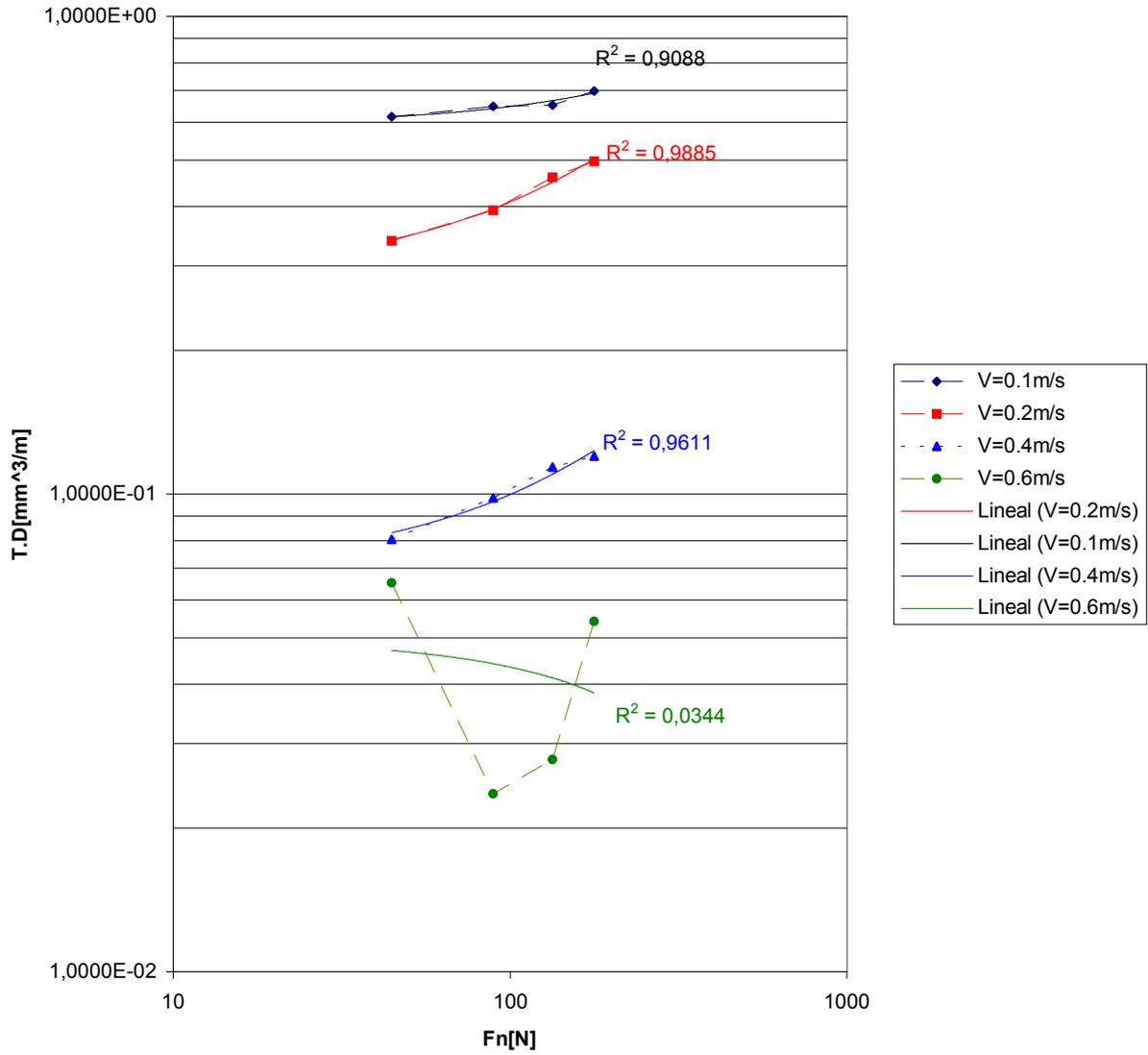
Temperatura vs. Distancia para 178 N y 0.6 m/s



**ANEXO E**

**GRAFICA LOGARITMO TASA DESGASTE VS. LOGARITMO  
CARGA APLICADA**

Log T.D vs Log Fn

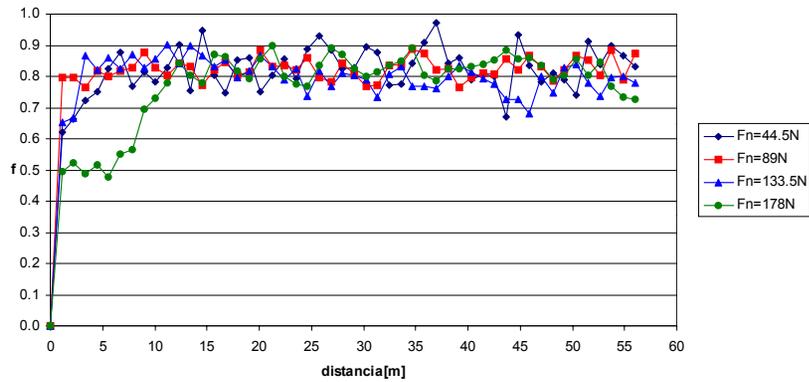


**ANEXOS F**  
**GRAFICAS COEFICIENTE DE FRICCIÓN PROMEDIO VS.**  
**DISTANCIA**

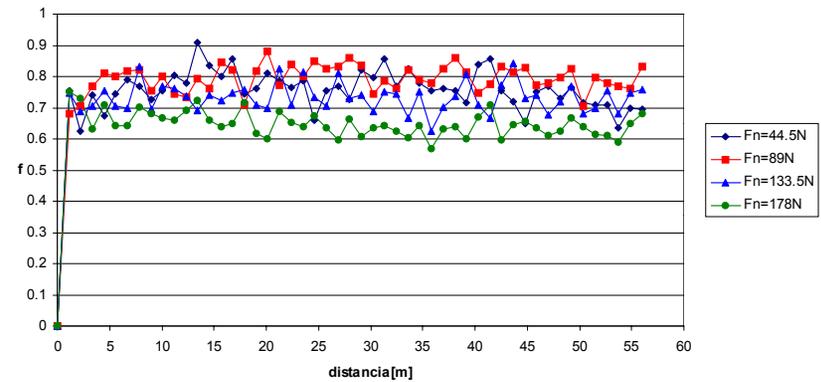
# ANEXO F-1

## Coeficiente de Fricción Promedio vs Distancia para Categoría de Velocidad Constante

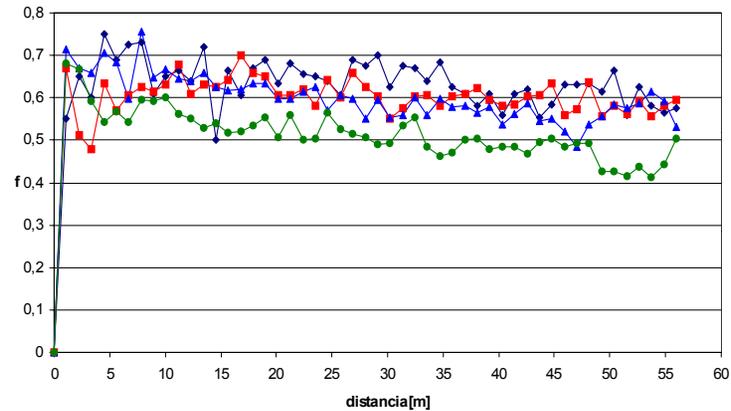
**Coeficiente de Fricción vs Distancia**  
Velocidad 0.1m/s



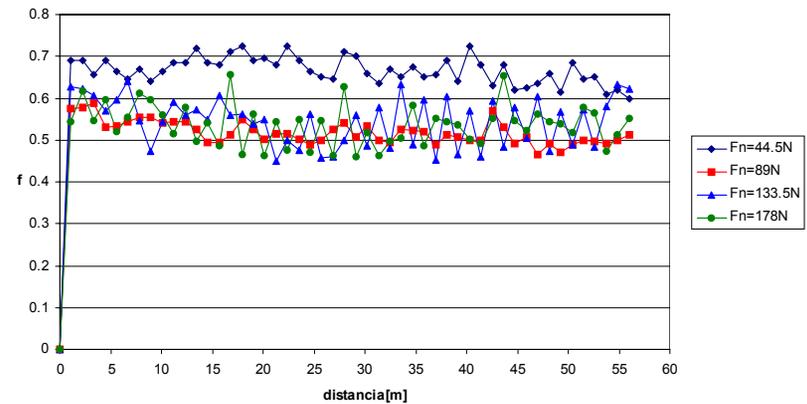
**Coeficiente de Fricción vs Distancia**  
Velocidad 0.2m/s



**Coeficiente de Fricción vs Distancia**  
Velocidad 0.4m/s



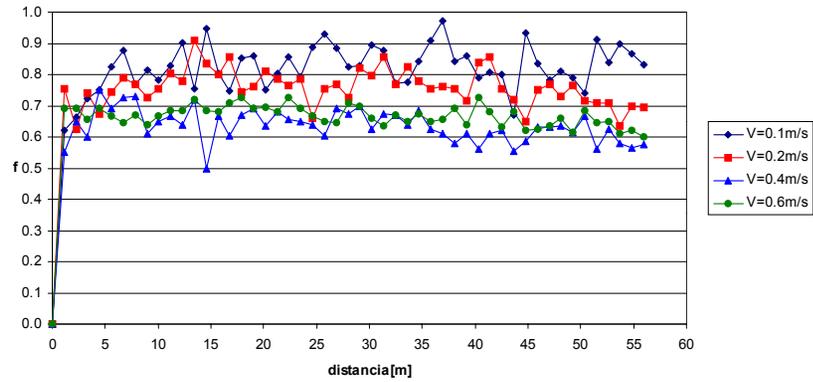
**Coeficiente de Fricción vs Distancia**  
Velocidad 0.6m/s



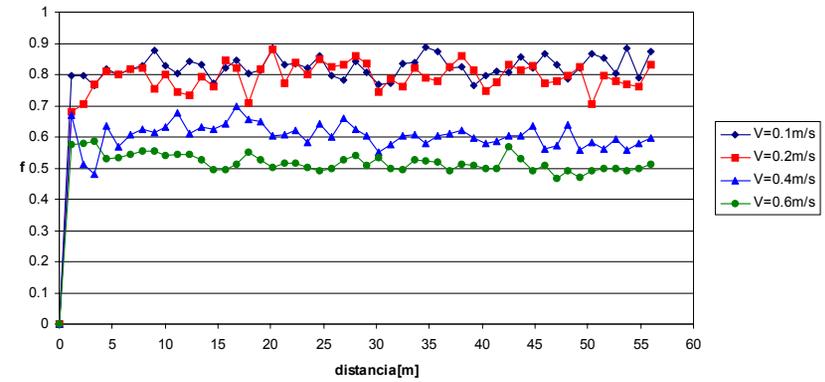
## ANEXO F-2

### Coeficiente de Fricción promedio vs Distancia para Categoría de Carga Constante

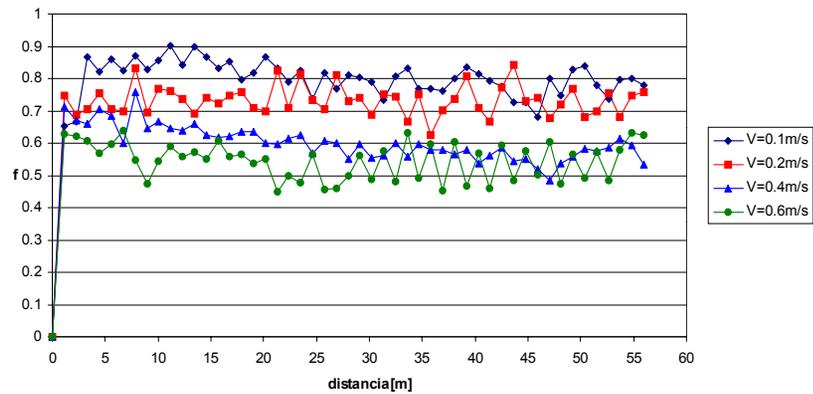
Coeficiente de Fricción vs Distancia  
Carga 44.5N



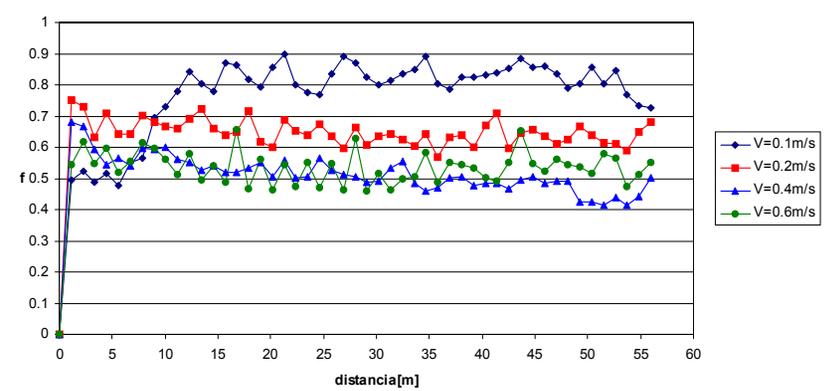
Coeficiente de Fricción vs Distancia  
Carga 89N



Coeficiente de Fricción vs Distancia  
Carga 133.5N



Coeficiente de Fricción vs Distancia  
Carga 178N



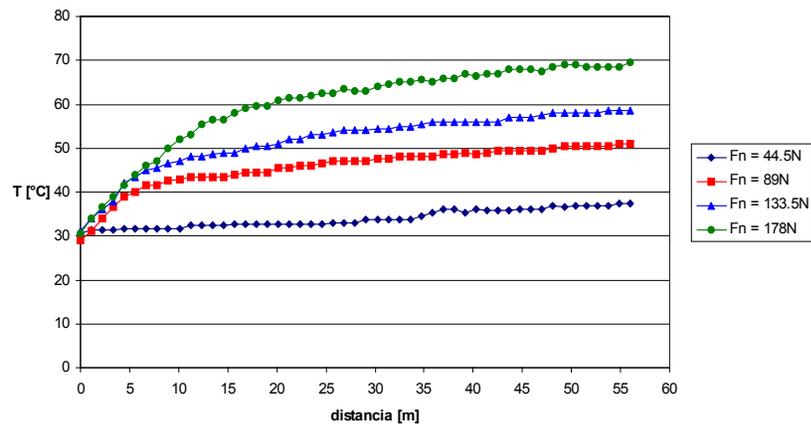
## **ANEXOS G**

### **GRAFICAS TEMPERATURA PROMEDIO VS. DISTANCIA**

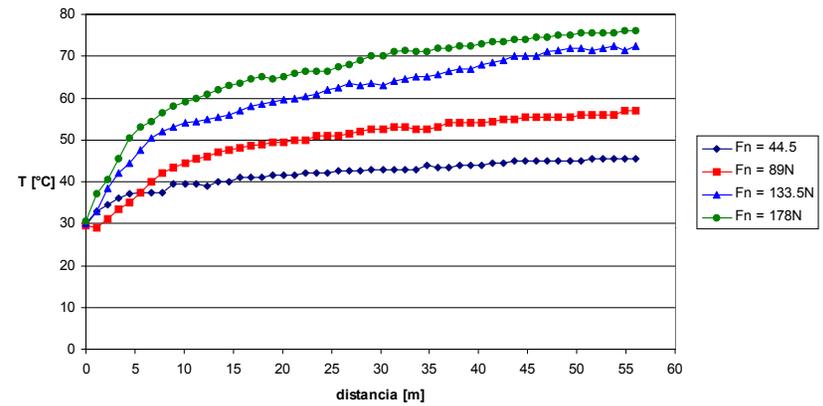
## ANEXO G-1

### Temperatura Promedio vs Distancia para Categoría de Velocidad Constante

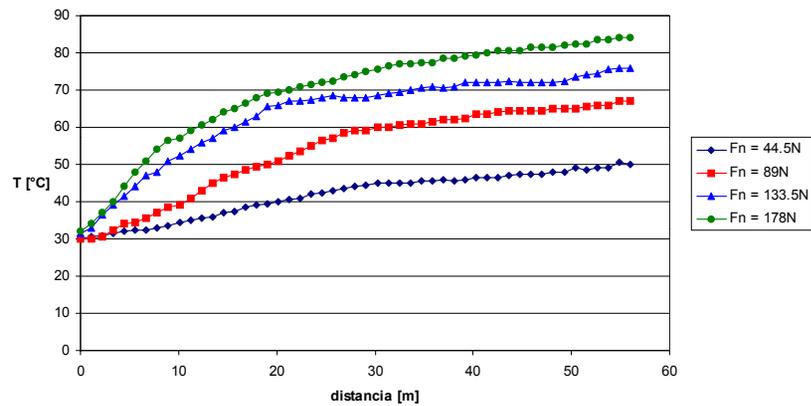
Temperatura vs Distancia para 0.1m/s



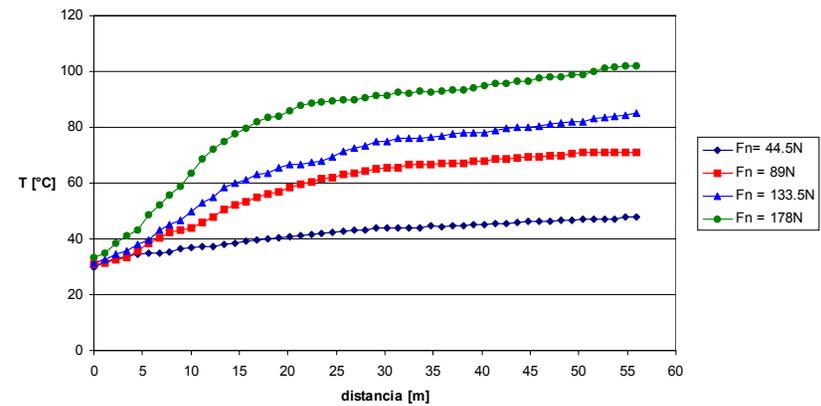
Temperatura vs Distancia para 0.2m/s



Temperatura vs Distancia para 0.4m/s



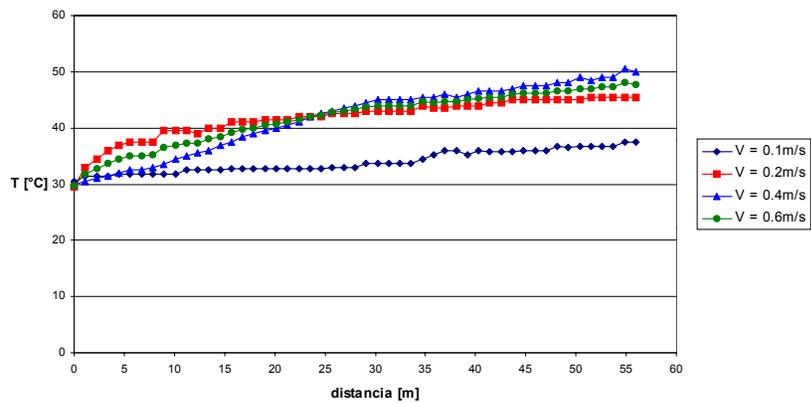
Temperatura vs Distancia para 0.6m/s



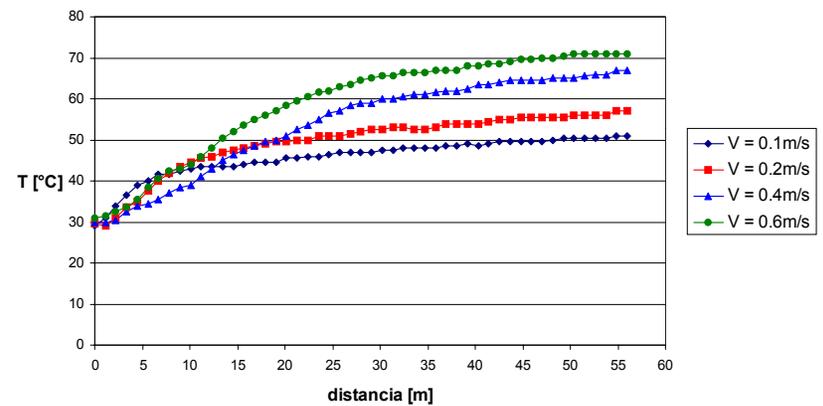
## ANEXO G-2

### Temperatura Promedio vs Distancia para Categoría de Carga Constante

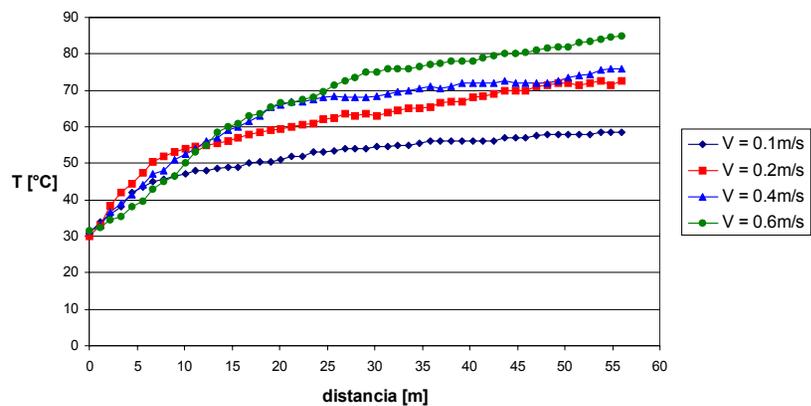
Temperatura vs Distancia para 44.5N



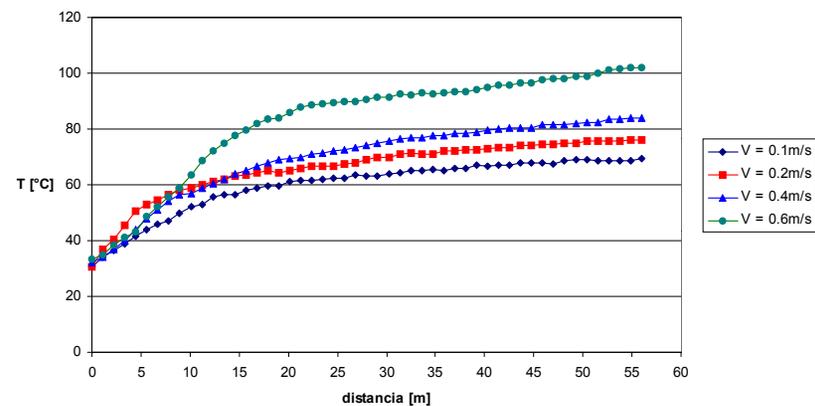
Temperatura vs Distancia para 89N



Temperatura vs Distancia para 133N

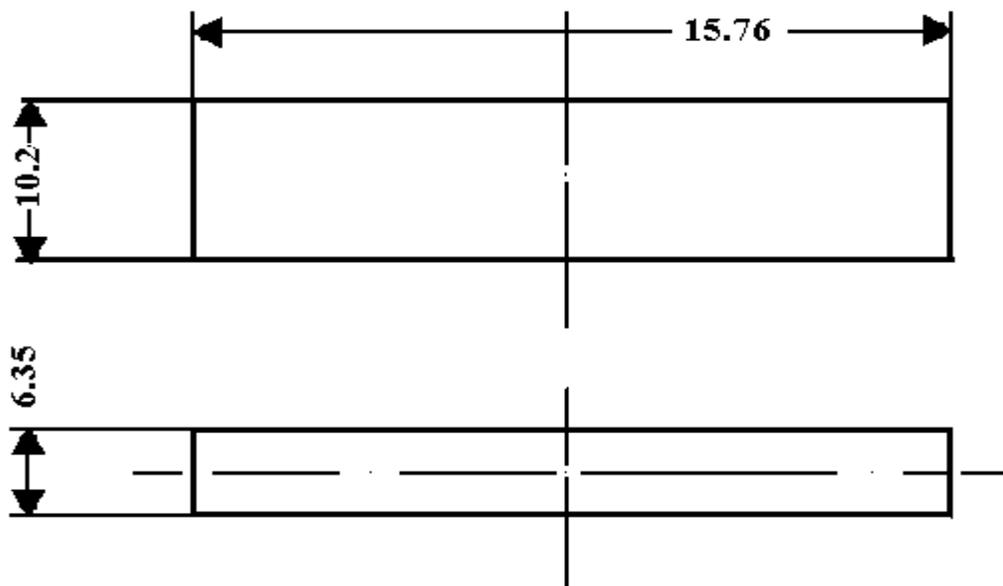


Temperatura vs Distancia para 178N



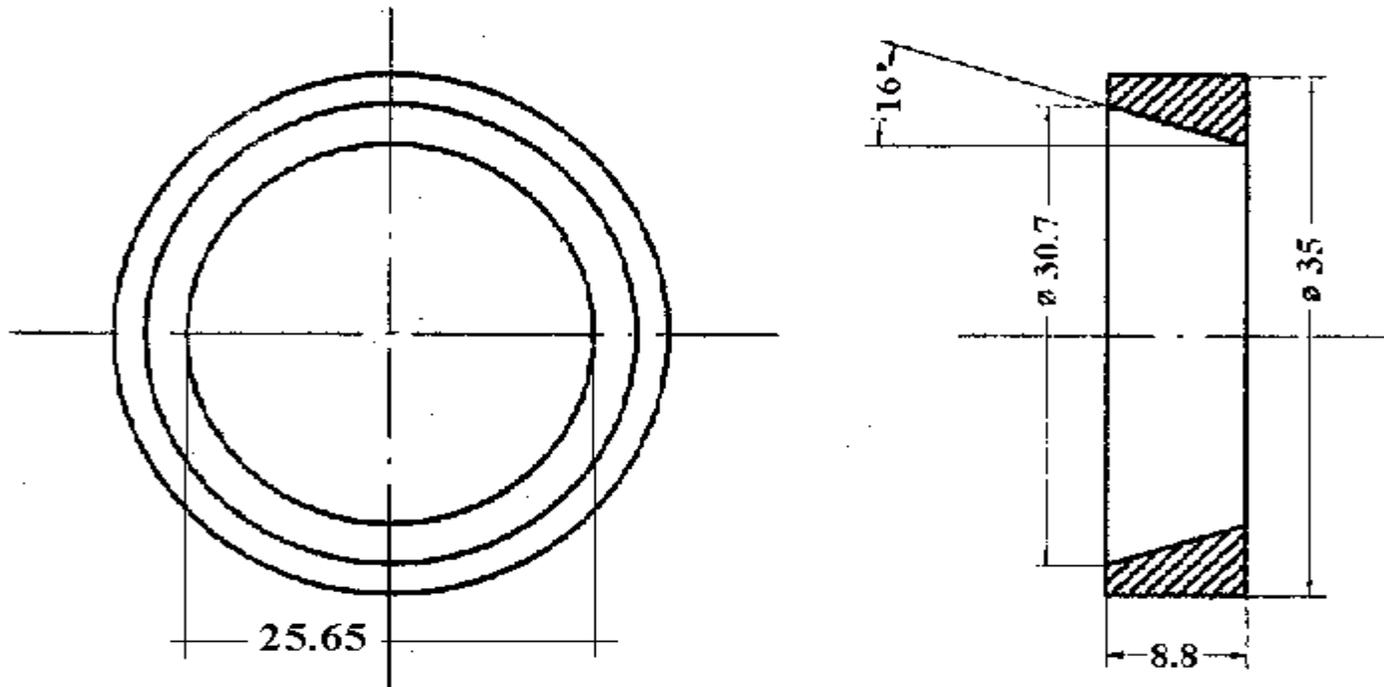
**ANEXOS H**  
**PLANOS**

**ANEXO H-1  
PLANO DEL BLOQUE**



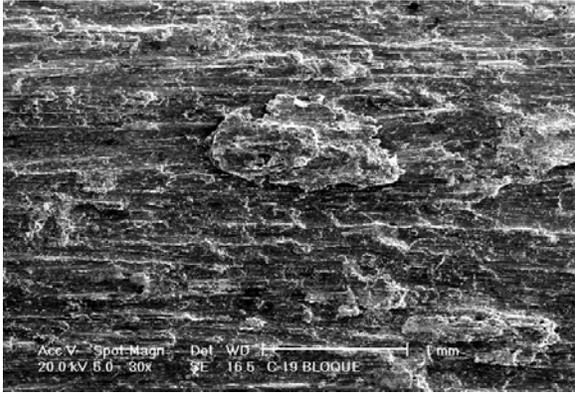
|   |                                  |  |                        |
|---|----------------------------------|--|------------------------|
| <b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b><br><b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b><br><b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> |                                  |  |                        |
| <b>BACHILLERES:</b><br><b>CUBILLÁN, ALFREDO</b><br><b>LICCIONIS, OSCAR</b>  |                                  | <b>BLOQUE PARA ENSAYO</b><br><b>MÁQUINA FALEX N° 1</b> |                        |
| <b>NORMAS:</b><br><b>DIN</b>  | <b>FECHA:</b><br><b>29/09/01</b> | <b>TOTAL:</b><br><b>1</b>                              | <b>N°:</b><br><b>1</b> |
| <b>REVISADO POR:</b>  | <b>ESCALA:</b><br><b>2 : 1</b>   |  |                        |

ANEXO H-2  
PLANO DEL ANILLO



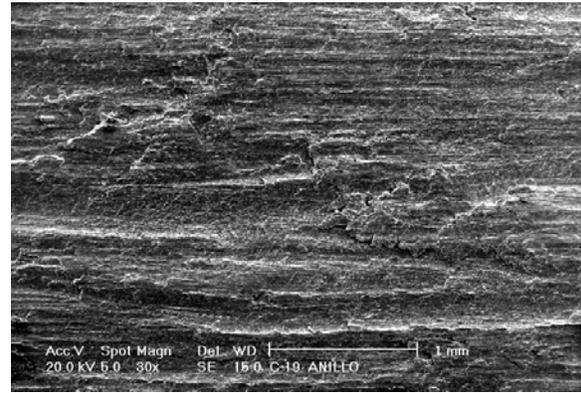
|   |                                  |  |                        |
|---|----------------------------------|--|------------------------|
| <b>UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA</b><br><b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b><br><b>ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA</b> |                                  |  |                        |
| <b>BACHILLERES:</b><br><b>CUBILLÁN, ALFREDO</b><br><b>LICCIÓNIS, OSCAR</b>  |                                  | <b>ANILLO PARA ENSAYO</b><br><b>MÁQUINA FALEX N° 1</b> |                        |
| <b>NORMAS:</b><br><b>DIN</b>  | <b>FECHA:</b><br><b>29/09/01</b> | <b>TOTAL:</b><br><b>1</b>                              | <b>N°:</b><br><b>1</b> |
| <b>REVISADO POR:</b>  | <b>ESCALA:</b><br><b>2 : 1</b>   |  |                        |

**ANEXOS I**  
**MICROFOTOGRAFÍAS**

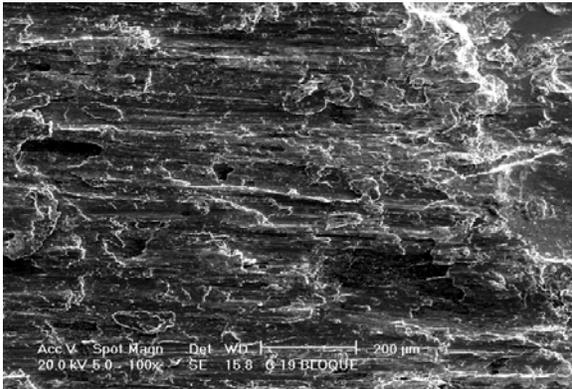


bloque (b)

Huellas del par tribologico (MEB 30X)  
 $F_n = 133.5N$  ;  $v = 0.2m/s$



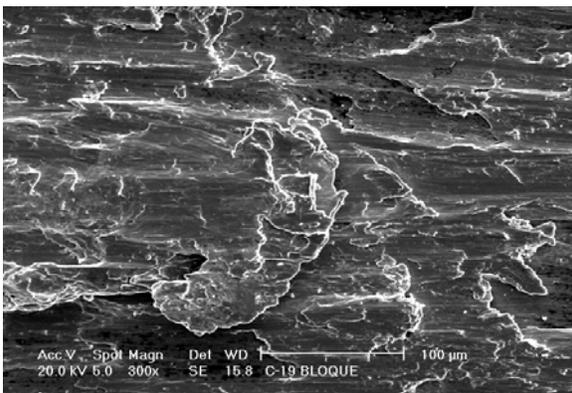
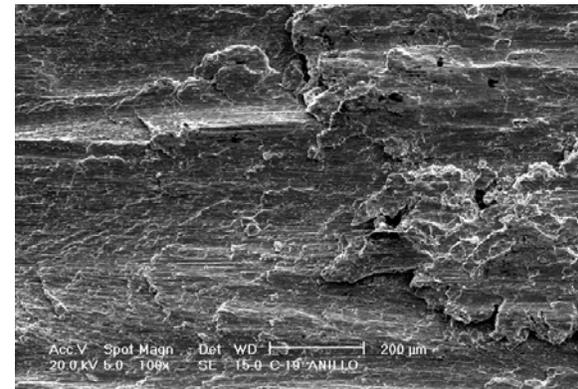
anillo(a)



(b)

Huellas del par tribologico (MEB 100X)  
 $F_n = 133.5N$  ;  $v = 0.2m/s$

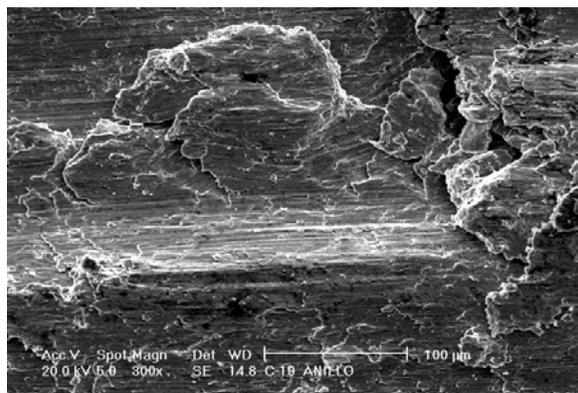
(a)

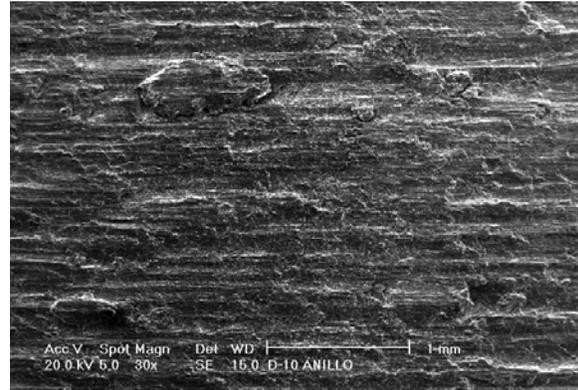
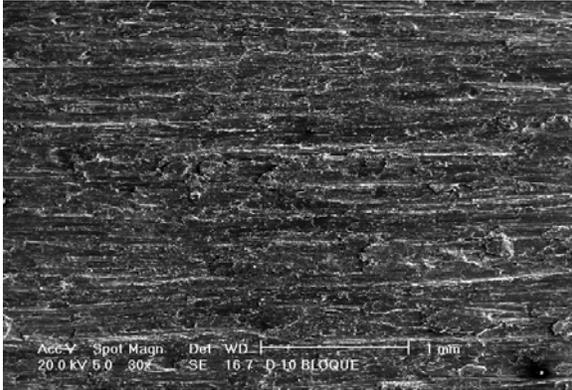


(b)

Huellas del par tribologico (MEB 300X)  
 $F_n = 133.5N$  ;  $v = 0.2m/s$

(a)

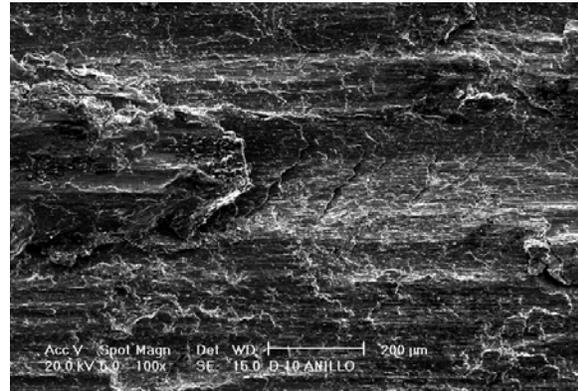
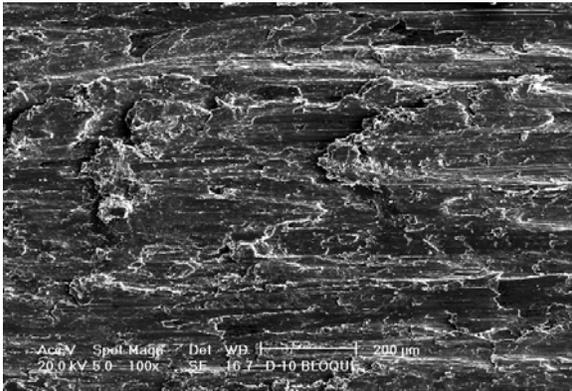




(b)

**Huellas del par tribologico (MEB 30X)**  
 $F_n = 89N$  ;  $v = 0.1m/s$

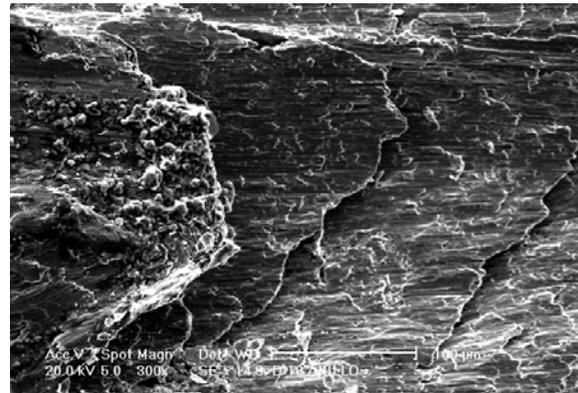
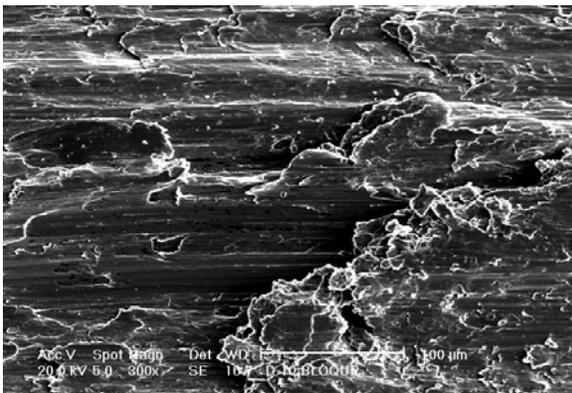
(a)



(b)

**Huellas del par tribologico (MEB 100X)**  
 $F_n = 89N$  ;  $v = 0.1m/s$

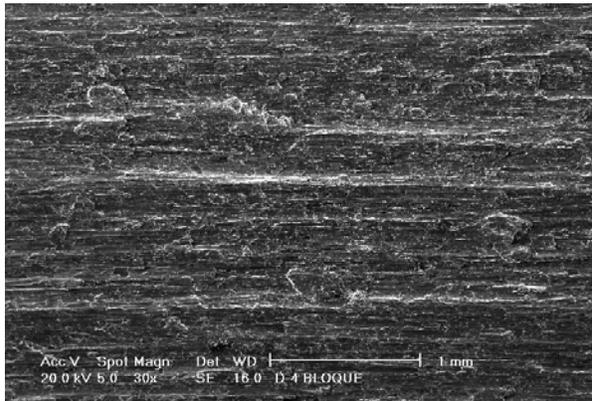
(a)



(b)

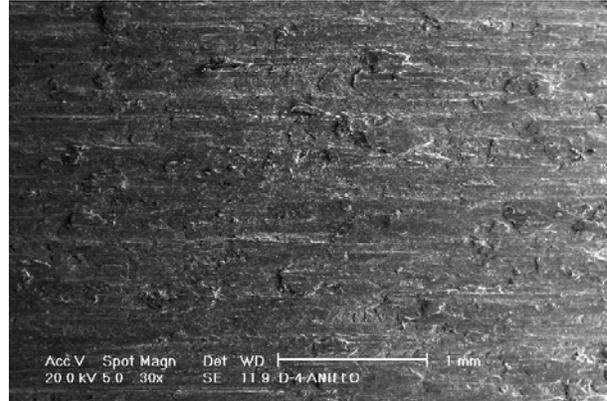
**Huellas del par tribologico (MEB 300X)**  
 $F_n = 89N$  ;  $v = 0.1m/s$

(a)

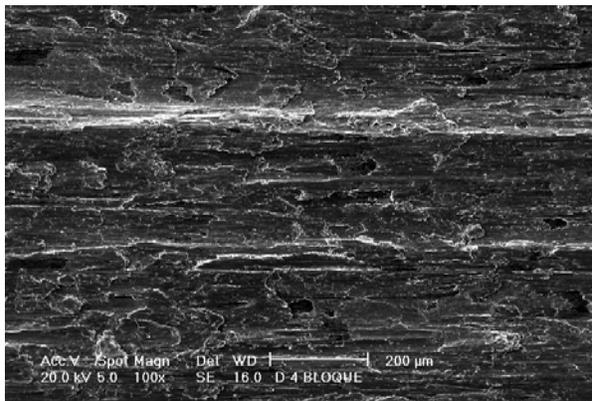


(b)

**Huellas del par tribologico (MEB 30X)**  
 $F_n = 44.5N$  ;  $v = 0.2m/s$

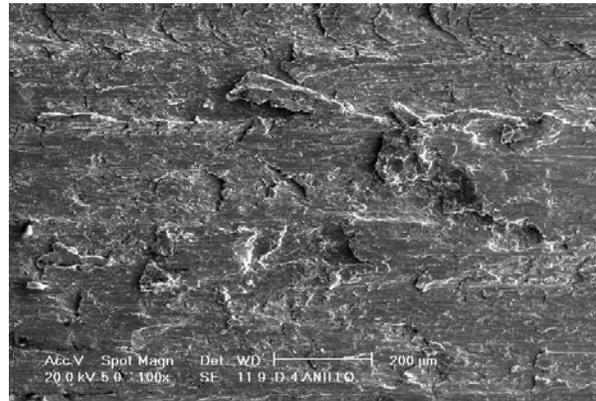


(a)

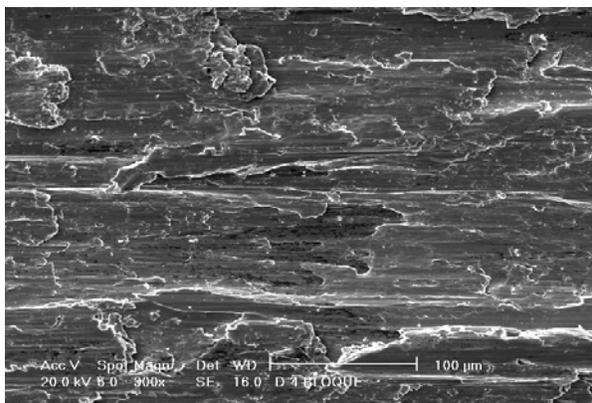


(b)

**Huellas del par tribologico (MEB 100X)**  
 $F_n = 44.5N$  ;  $v = 0.2m/s$

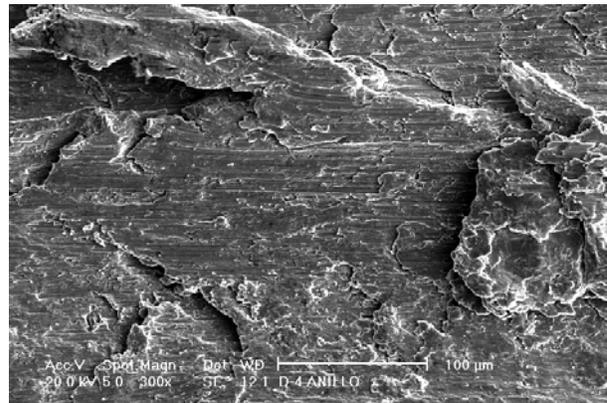


(a)

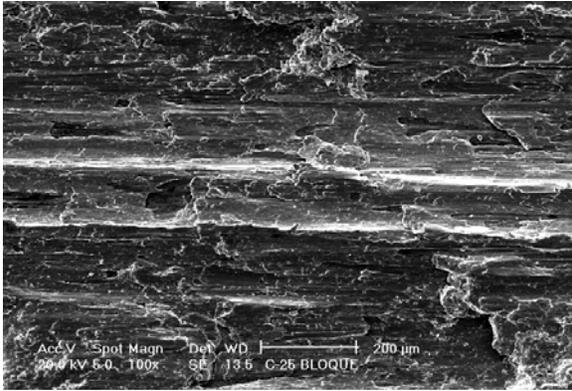


(b)

**Huellas del par tribologico (MEB 300X)**  
 $F_n = 44.5N$  ;  $v = 0.2m/s$



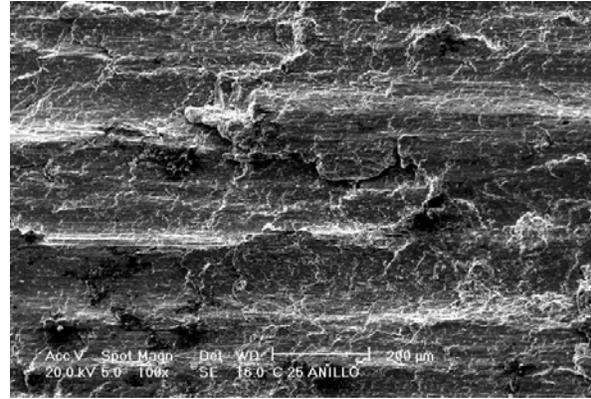
(a)



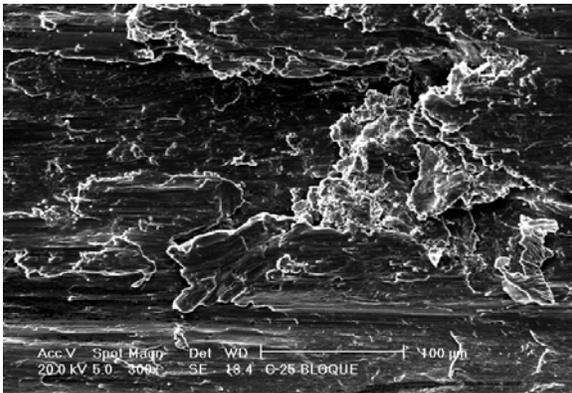
(b)

**Huellas del par tribologico (MEB 100X)**

**$F_n = 178N$  ;  $v = 0.1m/s$**



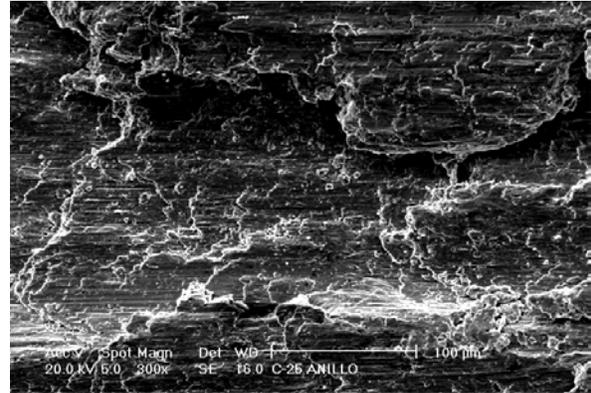
(a)



(b)

**Huellas del par tribologico (MEB 300X)**

**$F_n = 178N$  ;  $v = 0.1m/s$**



(a)