



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

**RESISTENCIA AL DESGASTE DE ACEROS ZINALQUIZADOS
POR INMERSIÓN EN CALIENTE**

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO
P R E S E N T A N :
CESAR DENOVA REYES
JUAN GILBERTO SALAS MÁRQUEZ

DIRECTORES DE TESIS.

**DR. ARTURO BARBA PINGARRON
DR. JOSE JAVIER CERVANTES CABELLO**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

JUAN GILBERTO SALAS MÁRQUEZ.

A Dios creador supremo,
por otorgarme parte de su ser.

A mis padres Leandro e Irma y a mis hermanos:
Maria de los Ángeles, Irma, Jesús y Oscarito.
Por estar conmigo y por proporcionarme lo necesario
para lograr mi existencia.

Al Dr. Arturo Barba Pingarrón,
por ser excelente persona y más que asesor;
darme trato de amigo.

Al Dr. Javier Cervantes Cabello,
por facilitar cuan cosa se necesitara para este trabajo.

A los miembros del jurado.

A la UNAM,
me halaga haberme formado en la universidad número uno de Iberoamérica;
una de las mejores del mundo y ahora patrimonio de la humanidad.

CESAR DENOVA REYES

A Dios Padre:
Siempre bondadoso que con tantos dones
inmerecidamente me ha colmado.

A mis padres Zenaido y Estela:
Por el apoyo, la confianza y el cariño que me
han brindado todos estos años.

A mi hijo Derek y mi esposa Montserrat:
Por ser el impulso que me motivo a seguir adelante.

A mi hermana Alma Delia:
Que siempre me ha apoyado, brindado su
cariño y por sus consejos para elegir el mejor
camino.

A la UNAM en especial a la Facultad de Ingeniería:
Por permitir la realización de mis estudios
y obsequiarme conocimientos, dedicación y profesionalismo

CONTENIDO.

CAPÍTULO.	Página.
<u>I. Introducción.</u>	<u>7</u>
<i>I.1. Objetivo.</i>	7
<i>I.2. Presentación.</i>	7
<i>I.3. Justificación.</i>	8
<i>I.4. Alcances.</i>	9
<i>I.5. Contenido del trabajo.</i>	10
<u>II. Desgaste.</u>	<u>11</u>
<i>II.1. Fundamentos del desgaste.</i>	11
<i>II.2. Principales tipos de desgastes.</i>	12
II.2.1. Adhesión.	13
II.2.2. Abrasión.	13
II.2.3. Socavadura.	13
II.2.4. Rozamiento.	14
II.2.5. Erosión y corrosión.	14
<i>II.3. Desgaste Adhesivo.</i>	15
II.3.1. Teoría del desgaste adhesivo.	15
II.3.2. Mecanismo de adhesión.	18
II.3.3. Efecto del recubrimiento en la superficie.	20
II.3.4. Ley del desgaste por adherencia.	20
II.3.5. Ángulo de aspereza.	22
II.3.6. Razón de desgaste y coeficiente de desgaste.	24
II.3.7. Criterio para la selección del material.	26
II.3.8. Control del desgaste adhesivo.	27
<i>II.4. Pruebas de desgaste adhesivo.</i>	28
II.4.1. Análisis metalúrgico.	31
II.4.2. Análisis gráfico.	32
II.4.3. Estudio comparativo.	35

III. Generalidades del Zinalquizado.	40
<i>III.1. Zinalco</i>	40
III.1.1. Historia.	40
III.1.2. Características, propiedades físicas y mecánicas del Zinalco.	41
III.1.3. Procesos de transformación usados para el Zinalco.	44
III.1.4. Aplicaciones del Zinalco.	44
<i>III.2. Concepto de recubrimiento metálico</i>	46
<i>III.3. Inmersión en caliente</i>	47
<i>III.4. Zinalquizado</i>	48
III.4.1. Aluminizado.	49
III.4.2. Proceso de Zinalquizado.	54
IV. Metodología para la realización de las pruebas de desgaste.	56
V. Obtención y análisis de resultados.	77
<i>V.1. Gráficas de la cantidad de pérdida de peso.</i>	78
V.1.1. Acero Zinalquizado superficie no rasurada.	78
V.1.2. Acero Zinalquizado superficie rasurada.	86
V.1.3. Acero recocido Zinalquizado superficie no rasurada.	91
V.1.4. Acero recocido Zinalquizado superficie rasurada.	97
V.1.5. Acero sin recubrimiento	102
V.1.6. Acero recocido sin recubrimiento.	107
<i>V. 2. Estudio comparativo de la cantidad de pérdida de peso.</i>	112
V.2.1. Prueba A.	113
V.2.2. Prueba B.	114
V.2.3. Prueba C.	115
V.2.4. Prueba D.	116
<i>V. 3. Determinación del coeficiente de desgaste.</i>	118
<i>V. 4. Determinación de la razón de desgaste.</i>	122

<i>V.5. Determinación de la resistencia al desgaste.</i>	124
V.5.1. Resultados gráficos.	124
V.5.2. Coeficiente de desgaste.....	125
V.5.3. Razón de desgaste.	126

VI. Conclusiones. **127**

Bibliografía y referencias. **130**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

I.1. OBJETIVO.

Determinar la resistencia al desgaste en el acero recubierto con Zinalco mediante la realización de pruebas de desgaste adhesivo, ensayos de microdureza y estudios metalográficos.

I.2. PRESENTACION.

El desgaste es uno de los daños más costosos para la industria y por esta razón las investigaciones buscan entender los mecanismos del desgaste que podrían disminuirlo o evitarlo, con la finalidad de mejorar la eficiencia, rendimiento o simplemente incrementar la vida útil del elemento en cuestión.

La superficie de los materiales, en este caso el acero, es la región más sensible a las agresiones del entorno, por lo que se propone recubrir con Zinalco la superficie de dicho material. El Zinalco es una aleación, relativamente nueva y está formada por Zinc, Aluminio y Cobre, y en estudios previos se descubrió que presenta buena resistencia a la corrosión.

La aleación Zinalco representa un logro de vinculación tecnológica después de años de investigación y cooperación entre empresas e instituciones, encabezadas por el Instituto de Investigación en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Grupo Falmex-Galvotec.

El desgaste, la fatiga y la corrosión son los tres problemas que más ocasionan el reemplazo de elementos de máquinas. Sin embargo el desgaste ha sido el menos estudiado y al que se le presta menos atención. Por ello, se pretende estudiar la resistencia al desgaste de aceros zinalquizados, donde esta última expresión se le denomina al proceso de recubrimiento de superficies con Zinalco por Inmersión en Caliente.

Se conoce al desgaste como el daño ocasionado a una superficie como resultado de un movimiento relativo entre dos superficies, las investigaciones actuales buscan comprender las causas y predecir sus consecuencias. Debido a este interés surge una ciencia denominada "Tribología" (del griego *tribos* que significa frotar), la cual agrupa varias disciplinas involucradas en la interacción de superficies en contacto, con movimiento relativo y con o sin la presencia de algún medio interpuesto.

Primordialmente se han establecido como formas principales de desgaste a los tipos: abrasivo, adhesivo, corrosivo y fatiga superficial, los dos primeros son fijos en su definición mientras que los dos últimos presentan variaciones según la forma en que se origine el desgaste. Para este trabajo se realizará la evaluación de la resistencia al desgaste mediante el análisis del *tipo adhesivo*, ya que éste comprende dos superficies sólidas deslizándose una sobre la otra bajo presión, y en este comportamiento se aplica para su análisis el principio de funcionamiento de un dispositivo “espiga en disco” (pin on disk), en dicho dispositivo se realizarán las pruebas de desgaste.

Por último, la resistencia al desgaste de aceros zinalquizados por inmersión en caliente se determinará mediante la evaluación de gráficas, así como del análisis de valores numéricos como el coeficiente y razón de desgaste, asimismo para lograr un juicio en la determinación de la resistencia al desgaste, se comparan resultados entre los aceros zinalquizados con los aceros sin zinalquizar, siendo por ello en el título del presente trabajo el término “aceros”; pues se refiere a combinaciones del acero SAE 1018 de la siguiente manera:

- Acero recubierto con Zinalco superficie rasurada.
- Acero recubierto con Zinalco superficie no rasurada.
- Acero recocido recubierto con Zinalco superficie rasurada.
- Acero recocido recubierto con Zinalco superficie no rasurada.
- Acero sin recubrimiento de Zinalco.
- Acero recocido sin recubrimiento de Zinalco.

I.3. JUSTIFICACIÓN.

Aunque se creó que el desgaste no ocasiona fallas violentas, pues tan solo trae consecuencias como la reducción de la eficiencia de operación, las pérdidas de potencia por fricción y el incremento de consumo de lubricantes. Los autores consideramos que por una falla de desgaste puede en algunos casos perderse el control de una máquina y en consecuencia perjudicar la salud humana que entorne dicha máquina.

Sabiendo que el Zinalco es un material que posee la resistencia a la corrosión; como la del zinc, es ligero como el aluminio, resistente como el acero estructural, posee excelente maquinabilidad y mejores propiedades mecánicas. Se puede inyectar, permitiendo la fabricación de piezas elaboradas en otros materiales y se puede eliminar los pasos de transformación y ensamble. El Zinalco tiene alta resistencia a la corrosión atmosférica, por lo que es útil también para cualquier configuración arquitectónica y estructural.

Se recubrirá con Zinalco el acero mediante el proceso de inmersión en caliente en virtud de la simplicidad que este proceso implica.

Ahora bien, aunque para el análisis del desgaste como tal se requiere un amplio y exhaustivo estudio, varios autores en el tema concuerdan con que se trate como “resistencia al desgaste” únicamente para el caso de la realización de pruebas en las que se requiere cuantificar diversos parámetros como la que destaca, pérdida de masa en función de tiempo o de desplazamiento. Ya que la resistencia al desgaste se conocerá determinando la pérdida de volumen en determinado tiempo.

Con lo anterior, Se tiene entonces como planteamiento de *hipótesis* lo siguiente:

El proceso de inmersión en caliente para recubrir los aceros de bajo carbono con la aleación Zinalco puede proporcionar mayor resistencia al desgaste que la observada en productos comerciales que actualmente se venden en el mercado.

I.4. ALCANCES.

Debido a que el fenómeno del desgaste en los materiales no está ampliamente estudiado quizás por ser una propiedad intrínseca de éstos, se ha preferido innovar mecanismos que reduzcan la fricción ya sea con elementos lubricantes o simplemente diseño. Se propone entonces inquirir más en el tema del comportamiento tribológico en los materiales.

Por otro lado, en la industria, el Zinalco es un material relativamente nuevo, razón por la cual el presente trabajo pretende mostrar el comportamiento del desgaste en el acero Zinalquizado; con la finalidad de aportar información relativa a la aleación y para consulta de quienes quieran conocer las características útiles para el diseño en ingeniería aunado al acero Zinalquizado.

Es preciso que se cuente con el conocimiento de la resistencia al desgaste, pues Toyota, compañía fabricante de automóviles, está interesada en la posibilidad del uso del Zinalco en la producción de piezas automotrices; como rines de Zinalco y posiblemente toda la carrocería de los automóviles.

Como Toyota y otras empresas, pueden mirar al Zinalco como un material alternativo para la innovación de elementos de máquina o en la mejora de elementos estructurales, o simplemente inspirar su funcionalidad en el uso de otro campo de estudio[3].

I.5. CONTENIDO DEL TRABAJO.

El presente trabajo esta constituido por seis capítulos estructurados de la siguiente forma:

En el capítulo uno se plantea el objetivo general a cumplir, una breve presentación que sirve de preámbulo en el tema, la justificación en donde se supone la hipótesis; así como argumentos para la realización de este trabajo. Se enuncian los alcances deseados.

En el capítulo dos, se fundamentan los conocimientos teóricos del desgaste necesarios para referenciar este trabajo, la obtención de parámetros como la razón de desgaste, y la sistemática típica en las pruebas de desgaste.

En el capítulo tres, se expone información relacionada con el Zinalco útil como complemento de este trabajo, se menciona a la inmersión en caliente como proceso de recubrimiento y también la técnica del Zinalquizado.

En el capítulo cuatro, se describen los pasos que se siguieron para la realización de las pruebas de desgaste: preparación de probetas, tratamientos térmicos, metalografías, toma de microdurezas, toma de micrografías y realización de ensayos de desgaste.

En el capítulo cinco, con base en la metodología del capítulo cuatro se muestran los resultados obtenidos y su respectiva interpretación en virtud de los datos conseguidos y de los conocimientos teóricos.

En el capítulo seis, en cumplimiento del objetivo se exponen las conclusiones a las que se llegó después de haber analizado los resultados obtenidos.

Por último se indican las referencias que auxiliaron la realización de este trabajo.

CAPÍTULO II

DESGASTE.

En este trabajo se tomará al desgaste como un factor a evitar en lo más posible sobre una superficie recubierta, luego entonces se trata de cuantificar la resistencia al desgaste en un material recubierto, en este caso, el acero Zinalquizado.

Se define a la resistencia como la propiedad que tiene un cuerpo de reaccionar contra la acción de otro cuerpo. Entonces se quiere conocer cuánto resiste el acero Zinalquizado mediante la reacción contra la acción de un elemento en movimiento. Esta situación es propia del desgaste de tipo adhesivo, pero como la superficie es recubierta, durante la realización de la prueba puede haber desprendimiento del recubrimiento pasando así a un desgaste de tipo abrasivo.

En virtud de la observación anterior, se analizará detenidamente al desgaste de tipo adhesivo, aunque puede particularizarse algún otro tipo de desgaste, éste partirá siempre de un fenómeno relacionado primordialmente con el desgaste adhesivo y es por ello que en este trabajo las pruebas se efectuarán bajo este principio.

II.1. FUNDAMENTOS DEL DESGASTE.

El desgaste puede definirse como el deterioro de la superficie debido al uso, por lo que para que exista desgaste debe existir una interacción entre superficies. Ocurre en una amplia variedad de operaciones, y en algunas industrias es muy elevado el gasto anual por concepto de reposición de piezas desgastadas. El desgaste es también muy importante en la práctica de la ingeniería; en muchos casos constituye el principal factor que limita la vida y el rendimiento de los componentes de máquinas. por ejemplo, un camión de 5 toneladas totalmente desgastado suele pesar entre dos y tres kilogramos menos que cuando nuevo.

El desgaste puede ser destructivo o normal; pero aun cuando sea normal puede ser más severo de lo deseable, debido a la frecuencia con que tengan que reponerse los elementos de máquinas, ya que ningún elemento es inmune al desgaste; pues este fenómeno se manifiesta siempre que exista carga y movimiento.

Por ejemplo, el escofinado de pistones en los motores de combustión interna, las picaduras y socavaduras en los engranes de transmisión, el rozamiento en prensas de ajuste forzado y la corrosión por cavitación en la superficie de un cilindro, son manifestaciones del desgaste.

Este fenómeno está afectado por toda una variedad de condiciones, tales como tipo y modo de la carga, velocidad, cantidad y tipo de lubricante, temperatura, dureza, acabado de la superficie, presencia de materiales extraños y naturaleza química del medio. Así como las condiciones varían en cada aplicación, también lo hacen las correspondientes manifestaciones de desgaste. Además, en la práctica, el desgaste es, generalmente, una combinación de una o más formas elementales como por ejemplo, las pequeñas partículas resultantes del raspado pueden causar desgaste abrasivo; o bien, la corrosión puede quedar totalmente velada por el raspado originado por el rozamiento en una prensa de ajuste forzado. Por lo tanto, no siempre es fácil, en cualquier aplicación dada, deducir qué tipo de desgaste ha ocurrido, no obstante que por lo general siempre se partirá de un comportamiento adhesivo.

La falta de acuerdo general en la nomenclatura y la falta de definición eficaz de las diferentes manifestaciones del desgaste tales como ludimiento, escofinado o raspado, abrasión y corrosión, complican aún más el tema. Sin embargo, un método lógico de clasificar el desgaste sería según la naturaleza de la superficie de contacto:

1. Metal contra metal.
2. Metal contra no metal.
3. Metal contra fluido.

Esta clasificación, a su vez, puede subdividirse en condiciones lubricadas y no lubricadas, fricción por deslizamiento o rodamiento, etc. Además, las condiciones pueden cambiar, y no que inicialmente era metal contra metal podría volverse metal contra no metal, o bien una lubricación que en un principio era adecuada podría fallar posteriormente. Por esta razón, la clasificación anterior pierde su utilidad en la práctica real de la ingeniería, por lo que se prefiere agrupar en términos de común comprensión.

II.2. PRINCIPALES TIPOS DE DESGASTE.

La siguiente clasificación indica de manera fundamental los tipos de desgaste más comunes, o bien, son los tipos reconocidos como importantes desgastes en la ingeniería de los materiales para el diseño.[5]

1. Adhesión.
2. Abrasión.
3. Socavadura.
4. Rozamiento.
5. Erosión.
6. Corrosión.

Sin embargo bajo acción mecánica, el desgaste suele presentarse esencialmente como un fenómeno adhesivo y de éste puede o no partir a otro tipo de desgaste

como al abrasivo, socavadura o al rozamiento, dependiendo de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga.

II.2.1. Adhesión.

La Adhesión es también conocida como: ludimiento, raspado, escofinado, rayado y desbastado. Aunque existen algunas diferencias entre estas formas de desgaste, según la severidad de la acción, desde el punto de vista de la ingeniería pueden ser agrupadas bajo un solo título: adhesión. Probablemente el tipo más importante de desgaste, dicho fenómeno está causado por la acción cortante de microsoldaduras formadas entre las asperezas de la superficie que realmente llevan la carga entre dos superficies correspondientes. En este caso, el movimiento relativo puede ser deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud. Se sabe que los picos superficiales que coinciden fluyen plásticamente y forman fuertes uniones endurecidas por el trabajado. A medida que éstas se rompen bajo la tracción tangencial impuesta, los sólidos van perdiendo material.

Este tipo de desgaste se presenta por la falla de la película que normalmente separa a las dos superficies. A su vez, la falla de la película está ocasionada por altas temperaturas, presiones y velocidades de deslizamiento.

II.2.2. Abrasión.

El desgaste abrasivo o de tipo cortante tiene lugar siempre que están presentes partículas extrañas duras, tales como areniscas de metal, óxidos metálicos, polvo y elementos del medio que permanecen atrapados entre las superficies en contacto. Estas partículas primero penetran en el metal y después rayan o desgarran partículas metálicas eliminando material. Según su intensidad, el desgaste abrasivo puede ser en forma de socavadura o de rayado. El desgaste abrasivo es uno de los tipos más comunes encontrados en la práctica de la ingeniería, y es probablemente la mayor causa aislada de desgaste en muchas aplicaciones de máquinas.

II.2.3. Socavadura.

La socavadura, fatiga por cargas cíclicas, la corrosión por socavadura, el astillamiento, las grietas y las picaduras constituyen fenómenos del mismo tipo. Por lo general se atribuyen a la repetición cíclica de los esfuerzos de contacto entre dos superficies correspondientes, tales como un par de engranes o un anillo de bolas, sujetos a una carga. La intensidad del esfuerzo causa una grieta que separa una partícula del cuerpo principal del material. La cavidad así formada es una socavadura, de la cual suele dispersarse parte del material hacia afuera, por astillamiento.

En el carácter destructivo de las socavaduras intervienen una multitud de factores, tales como altos esfuerzos producidos por contacto, acción deslizante acompañada por acción de rodamiento, posible formación de una onda elástica delante del área instantánea de contacto, escurrimiento de superficie y fatiga subsuperficial. Así mismo se distingue entre las socavaduras incipientes, que pueden ser borradas por subsecuentes acciones de desgaste, y las socavaduras destructivas que conducen a fallas por fatiga.

II.2.4. Rozamiento.

El rozamiento (también conocido como: corrosión por rozamiento, desgaste por oxidación, oxidación por fricción y fatiga por frotamiento) se caracteriza por movimientos recíprocos entre las superficies de desgaste, limitados por una fuerza normal, como en las prensas de ajuste forzado. El daño puede variar, desde la simple alteración de las superficies de contacto, hasta el desgaste de 1.6 mm del material. Además, la superficie puede mostrar la formación de una gran parte de material corroído. Se considera que el movimiento oscilatorio rompe cualquier película de naturaleza protectora que lleve la superficie, haciendo que el metal se adhiera y se desprenda en cada oscilación. Los restos pueden entonces convertirse en un óxido abrasivo que causa el grave daño. El daño por rozamiento ocurre en las chumaceras de las ruedas delanteras de los automóviles, en pivotes, en los balancines o palancas de vaivén, en propulsores de paso variable, en trenes de aterrizaje, en las levas seguidoras y en los contactos eléctricos.

II.2.5. Erosión y Corrosión.

Estos dos tipos de desgaste son procesos de daño superficial y desprendimiento de material cuando las partículas duras inciden sobre los sólidos.

Cuando las partículas duras inciden sobre los sólidos, se produce desgaste por erosión, este tipo de desgaste es causado por un líquido o un gas en ausencia de una segunda superficie, y cuando un componente rota en un medio fluido habrá erosión por cavitación.

La corrosión no necesariamente puede ser originada por el mecanismo de adhesión o abrasión, ya que se debe a la presencia de una reacción química entre el material y el oxígeno con otros gases a diversas temperaturas, deteriorando la superficie.

II.3. DESGASTE ADHESIVO.

Dos superficies que interactúan sólo tienen contacto en unos cuantos puntos aislados, lo que hace que aparezcan esfuerzos elevados en estas áreas. Esto produce flujo plástico en la interface y se conoce que la resistencia al deslizamiento equivale a la suma de las fuerzas cortantes necesarias para romper todas estas uniones suponiendo que no existe un factor de hundimiento [7]. Si bien en esta forma se toma en cuenta la fricción, aún no existen todos los elementos para establecer una ley general del desgaste que pueda ser utilizada, posiblemente porque el desgaste es un proceso complejo que depende, entre otras cosas de la carga normal, la estructura cristalina y las propiedades mecánicas de los materiales.

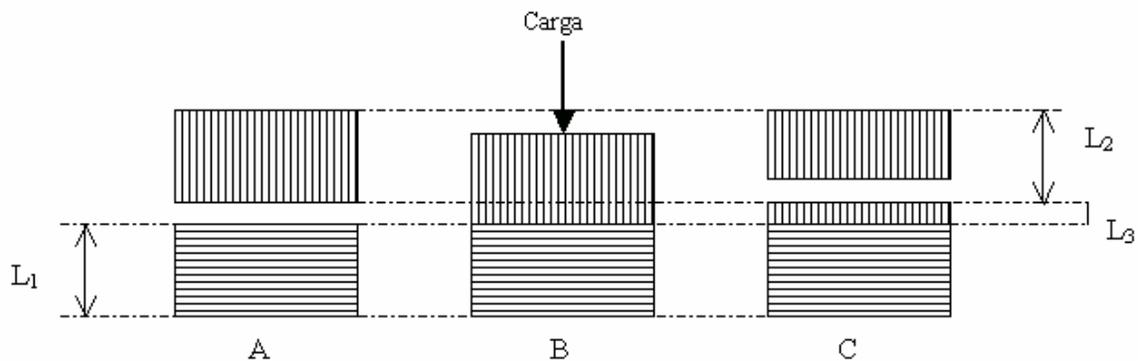


Figura 2.1. Esquema del desgaste adhesivo. En A dos cuerpos se van a unir, en B ya están unidos mediante una carga normal en uno de ellos, en C los cuerpos se separan y a L_1 se adhiere o desaparece L_3 que antes era parte del cuerpo L_2 .

Se han formulado leyes para el desgaste y se ha estudiado el desgaste por adherencia que se define como *el proceso que produce pérdida de metal entre superficies que interactúan como resultado de la adherencia entre asperezas*.

El desgaste por este mecanismo es severo y puede presentarse en la cadena cinemática de una máquina siempre que no existe lubricación adecuada en la interface de dos cuerpos en contacto.

II.3.1. Teoría del desgaste adhesivo.

Esta teoría supone que la carga w entre dos cuerpos en contacto deslizante está dividida entre un cierto número de asperezas cuya área total A es igual a w/p , donde p es la presión de cedencia del material más reblandecido. Si existe buena adhesión entre las dos superficies por medio de sus asperezas, se considera que forman un solo cuerpo. Entonces la fuerza de fricción F se determina multiplicando el área adherida por la resistencia al corte de los dos cuerpos: $F = As \dots (2.1)$

Se define al coeficiente de fricción como:

$$f = \frac{F}{w} \dots (2.2)$$

donde: F = fuerza de fricción.

w = carga entre dos cuerpos en contacto.

Sustituyendo en 2.2 primero a 2.1 y luego $A = w/p$ se obtiene que el coeficiente de fricción es:

$$f = \frac{s}{p} \dots (2.3)$$

donde: s = resistencia al corte del más débil de los dos metales en contacto.

p = presión que ocasiona flujo plástico en el metal más reblandecido, o resistencia a la compresión en el punto de cedencia.

Lo cual indica que f es independiente de la carga o de la aparente área de contacto.

Sin embargo, las cantidades s y p no pueden identificarse con la resistencia al corte en volumen y con la dureza del material. Esto introduce una grave dificultad en la evaluación cuantitativa. Tiene lugar un flujo plástico que, acompañado de calentamiento y altas presiones locales, forma uniones soldadas entre las dos superficies. La resistencia de estas uniones determina la resistencia de la adhesión.

De esta manera, la fuerza necesaria para cortar una determinada unión adherida en presencia de una carga normal, no sería la misma que la que se requiere cuando no hay carga, como en el caso de una prueba convencional de corte. Sin embargo, se observó que cuando la adhesión sólida se presenta en las regiones de contacto real entre las superficies metálicas, la fuerza para cortar las uniones se aproxima bastante al producto del área de la sección transversal de las uniones por la resistencia del material en volumen.

Esta fuerza de fricción es aproximadamente el 80% de la fuerza tangencial necesaria para cortar la soldadura. El 20% restante se requiere para nivelar las asperezas más duras distribuyéndolas entre las más blandas [5].

El modelo más aceptado se basa en la extracción y eliminación de los átomos superficiales debido a la acción combinada de las fuerzas de cohesión y repulsión que existen en los cristales metálicos, ese desgaste es inversamente proporcional a la presión de flujo σ del metal, a medida que comienza el deslizamiento, el contacto entre átomos elimina los átomos superficiales, de manera que la pérdida de volumen v para una distancia de deslizamiento x es:

$$v = z A_t x \dots (2.4)$$

donde A_t es el área real de contacto y z es el número de átomos que se eliminan.

Se supone que un área real de contacto es la misma que se considera en la fricción, entonces si w es la carga aplicada y σ es la presión de flujo del metal más blando.

$$A_t = \frac{w}{\sigma} \dots (2.5)$$

Sustituyendo 2.5 en 2.4 resulta lo que se conoce como la *razón de desgaste* del volumen por unidad de distancia deslizada.

$$\frac{v}{x} = z \frac{w}{\sigma} \dots (2.6)$$

La ecuación 2.6 establece que el volumen total de material eliminado por deslizamiento es proporcional a la carga normal aplicada, la distancia de deslizamiento y es inversamente proporcional a la presión de flujo del material. Asimismo indica que el volumen de metal eliminado durante la interacción de las superficies es independiente del área de contacto aparente.

En términos de la dureza, también se puede conocer el volumen del material desgastado v .

$$v = \frac{k wx}{3H} \dots (2.7)$$

Se presenta una carga w deslizando sobre una distancia x , siendo H la dureza de la superficie que está siendo desgastada. El término k se conoce como el coeficiente de desgaste y representa la probabilidad de que se forme un fragmento adhesivo. Al igual que el coeficiente de fricción, el coeficiente de desgaste es una cantidad adimensional.

De 2.7 se puede conocer el tamaño de la partícula desprendida, si ésta se considera una semiesfera de diámetro d .

$$d = \sqrt[3]{\frac{12v}{\pi}} \dots (2.8)$$

II.3.2. Mecanismo de adhesión.

Las superficies correspondientes de dos partes de una máquina no son lisas cuando se consideran a escala atómica, 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.

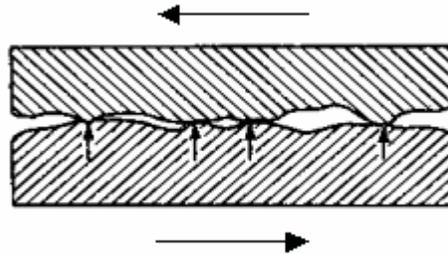


Figura 2.2 Esquema de una vista ampliada de dos superficies en rozamiento

En el caso de la lubricación en los linderos, las películas contaminantes a menudo se fragmentan, permitiendo el contacto entre las asperezas. Por lo tanto, es necesario tomar medidas para evitar el daño en la superficie cuando tal descomposición ocurra.[5]

Cuando dos piezas de metal desnudo entran en contacto, tienden a adherirse entre sí. Esta tendencia natural se origina por la presencia de electrones en exceso, o por la carencia de suficientes electrones, en los átomos de las superficies de los metales. Como las partes de los metales se desplazan entre sí, las adhesiones formadas tienen que romperse. Si la unión formada es más débil que ambas partes metálicas, la fractura ocurrirá en la interface de los metales, con poca transferencia de metal de una parte a otra.

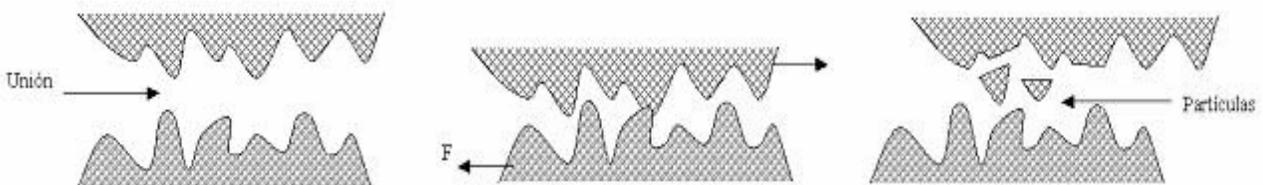


Figura 2.3 Las asperezas en dos superficies rugosas inicialmente pueden unirse, pero una fuerza puede romper las uniones y hacer que las superficies se deslicen; al ocurrir esto pueden fracturarse las asperezas, desgastándose las superficies y produciendo partículas.

Sin embargo, ocurrirá una cierta deformación plástica en la adhesión de las asperezas, cuya extensión depende de la resistencia de la unión.

Como las asperezas tenderán a ponerse en contacto repetidamente conforme se repita el ciclo de operación, continuamente tendrán lugar pequeñas cantidades de deformación. El resultado de esto será un trabajo de endurecimiento de las asperezas, con el consiguiente decremento en la ductibilidad de los metales.

Después de cierto tiempo, que dependerá de la cantidad de deformación en cada ocasión que se efectúe el contacto, las asperezas se volverán frágiles y tenderán a romperse. El resultado puede ser la pérdida de un pequeño fragmento de metal entre las partes. La transferencia de metal ocasionará rayado, mientras que la pérdida de una partícula de metal causará desgaste abrasivo.

Si la adhesión entre los metales es más fuerte que uno de los metales, o que ambos, el metal más débil sufrirá fractura. En este caso, parte del metal más débil se adhiere al otro. La aspereza a la que se adhiere el metal será más grande y probablemente encontrará más asperezas que antes. Además, en algunas áreas se desarrollará una condición de metales semejantes en contacto. Ambos resultados tenderán a promover aún más adhesiones y las transferencias de metal.

La condición de metales semejantes en contacto causará uniones con fuerzas cohesivas más bien que adhesivas. De esta manera, la resistencia de las adhesiones tenderá a hacerse mayor en estas áreas. El daño resultante dependerá de si el corte ocurre en la interface o en el volumen del material. Como rara vez ocurrirá en la interface, el daño será intenso. Por esta razón, el deslizamiento en metales similares puede causar fuerte desgaste.

La transferencia de metal de una parte a otra ocasionará que una de las partes aparezca más desgastada. Este desgaste se presentará únicamente en las áreas de las asperezas y tenderá a ocurrir en una pauta lineal. Esta es la condición del rayado. Si se desarrollan suficientes adhesiones, la fuerza requerida para romperlas será superior a la fuerza aplicada en la operación, y los metales quedarán imposibilitados para deslizarse entre sí. Esta es la condición de desbastado.

Existen factores que ayudan a minimizar el grado de desgaste por adherencia y son los siguientes.

1. Las cargas bajas reducen el grado de desgaste.
2. Si ambas superficies tienen altas durezas que sean prácticamente las mismas, el grado de desgaste es bajo.
3. Las superficies lisas reducen la posibilidad de que las asperezas se unan, proporcionando un desgaste más lento.
4. Impedir la adhesión minimiza el desgaste, además de que el desgaste adhesivo es menor cuando se usa un lubricante.

II.3.3. Efecto del recubrimiento en la superficie.

Recordando la expresión 2.3 que define al coeficiente de fricción como:

$$f = \frac{s}{p}$$

donde: s = resistencia al corte del más débil de los dos metales en contacto.

p = presión que ocasiona flujo plástico en el metal más reblandecido, o resistencia a la compresión en el punto de cedencia.

Para reducir el coeficiente de fricción y mantener fija la resistencia a la compresión, es necesario usar un recubrimiento de baja resistencia al corte (reduciendo, por lo tanto, el denominador del coeficiente de fricción) sobre un cuerpo de alta resistencia. De esta manera, la carga será soportada a través de la película por el material duro de la base, mientras que el corte ocurre en el recubrimiento delgado y blando.

El coeficiente de fricción depende de la resistencia al corte del recubrimiento en la superficie. Estos recubrimientos de baja resistencia al corte pueden ser de los siguientes tipos: óxidos, recubrimientos de reactivos químicos (cloruros, sulfuros, etc.), metales, lubricantes, fluidos, etc.

Otra importante función del recubrimiento, además de disminuir la resistencia al corte, consiste en actuar como un antifundente para reducir la soldadura o la adhesión de las asperezas. Esto reducirá tanto la fuerza de fricción necesaria para romper estas soldaduras, como el desgaste originado por el rompimiento y la transferencia de metal de estas asperezas. Se obtiene mejor adhesión entre el recubrimiento y la superficie, mayor resistencia del recubrimiento a la ruptura y, en consecuencia, una mayor protección contra la soldadura.

II.3.4. Ley del desgaste por adherencia.

Dos superficies nominalmente planas hacen contacto en las asperezas elevadas que fluyen plásticamente a causa de los esfuerzos localizados que se concentran allí. Cuando la carga es muy ligera, el contacto sólo ocurre en tres puntos y, a medida que aumenta el esfuerzo externo, el área original de contacto se incrementa. Cuando esto sucede, el ajuste entre el par mejora, esto es, el espacio entre las dos superficies disminuye, lo que da como resultado que más protuberancias tengan contacto en otras partes. Se descarta la idea de que se eliminen átomos aislados de las superficies o sea, se supone que el desgaste se produce por eliminación de fragmentos de metal de la superficie. Suponiendo que un fragmento producido por desgaste sea hemisférico con un diámetro promedio $2r$, el área real de contacto A_r es:

$$A_t = n \pi r^2 \dots (2.9)$$

en donde n es el número de uniones. Ahora de 2.5 y despejando n de 2.9

$$A_t = \frac{w}{\sigma} \dots (2.5)$$

Se tiene que el número de uniones es:

$$n = \frac{A_t}{\pi r^2} = \frac{w}{\sigma \pi r^2} \dots (2.10)$$

En las uniones circulares de diámetro $2r$, la distancia recorrida para romper una unión por tracción tangencial se considera como $2r$. En una situación como ésta, un cuerpo se mueve una distancia $2r$ en relación con la otra superficie. Puesto que el número total de asperezas es n , el número de asperezas por unidad de deslizamiento es:

$$n_u = \frac{n}{2r} = \frac{w}{2\sigma \pi r^3} \dots (2.11)$$

No todas las uniones que se rompen forman fragmentos de desgaste. Este es un argumento importante ya que se sabe que una fricción elevada no necesariamente corresponde a un desgaste proporcionalmente alto. Así pues, mientras que la ruptura de cada unión da como resultado una componente de resistencia al deslizamiento, no siempre se produce un desprendimiento de la superficie metálica que dé lugar a la formación de residuos. Puede significar simplemente que a medida que se rompe la unión, permanece unida a la superficie metálica en forma de áreas rugosas microscópicas o bien, si es plástica, puede extenderse sobre la superficie metálica.

Por lo tanto, suponga que hay una probabilidad β de que para n_u uniones por unidad de distancia deslizada se formen cierto número de fragmentos de desgaste. Entonces, para una distancia mayor s que produzca un volumen total de desgaste v , la razón de desgaste por unidad de distancia deslizada se representa como:

$$\frac{v}{s} = \beta n_u g \dots (2.12)$$

En donde g es el volumen de un fragmento de desgaste, generalmente se considera de tipo hemisférico.

$$g = \frac{2}{3} \pi r^3$$

Sustituyendo la expresión anterior y 2.11 en 2.12 resulta:

$$\frac{v}{s} = \beta \frac{w}{3\sigma}$$

$$v = \beta \frac{w}{3\sigma} s \dots (2.13)$$

La expresión 2.13 es la ley del desgaste por adherencia, y dice que “el volumen v de desgaste es igual a la probabilidad de formación de uniones por unidad de distancia β por una carga deslizada w sobre la presión de flujo del metal más blando 3σ ”.

Demuestra que el volumen del residuo de desgaste es independiente del área de contacto aparente. El tamaño de las uniones no se considera en la ecuación, pero sí se considera un factor de forma, el 3, que generalmente es de tipo hemisférico pero es distinto si es de tipo cúbico o cilíndrico, estos últimos poco comunes.

II.3.5. Ángulo de aspereza.

Las superficies reales no se encuentran en una distribución regular de protuberancias hemisféricas, sino que tienen formas, probablemente entre cono y hemisferio. La razón de desgaste de los metales, se deduce en la siguiente forma. Se supone una interface en donde la superficie inferior es perfectamente plana pero la superficie superior está ondulada con asperezas metálicas a distancia “ h ” de la superficie plana.

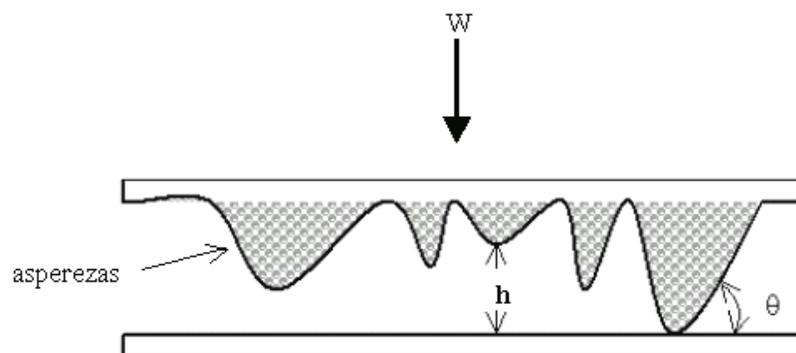


Figura 2.4 Una superficie plana en contacto próximo a otra con asperezas.

Observando el esquema de la figura 2.4 se explica que la superficie plana correspondería al elemento en movimiento mientras que la superficie superior corresponde al elemento fijo, siendo las asperezas integrantes del recubrimiento. Lo cual hace suponer que las mismas asperezas tienen una distribución aleatoria en el espacio y que cada una tiene un ángulo base θ .

En el instante en que no hay carga la altura de referencia es h , pero si las puntas de las asperezas son aplastadas debido al esfuerzo de contacto, la superficie superior se mueve en relación con $h = 0$.

Sea $n =$ número total de asperezas y $\sigma =$ presión de flujo del material superior, el modelo simplificado muestra que sólo la cúspide de una aspereza toca la superficie inferior de manera que todas las cúspides de las n asperezas se encuentran a distancias $[r = 0, 1, 2, 3, 4, \dots (n - 1)]h$ respectivamente.

Una aspereza será aplastada a un diámetro basal $2r$ dependiendo de la carga y se supone que la superficie superior elimina esta porción deformada del cono a medida que se desliza a través de una distancia $2r$. Esto se muestra en forma esquemática en la siguiente figura.

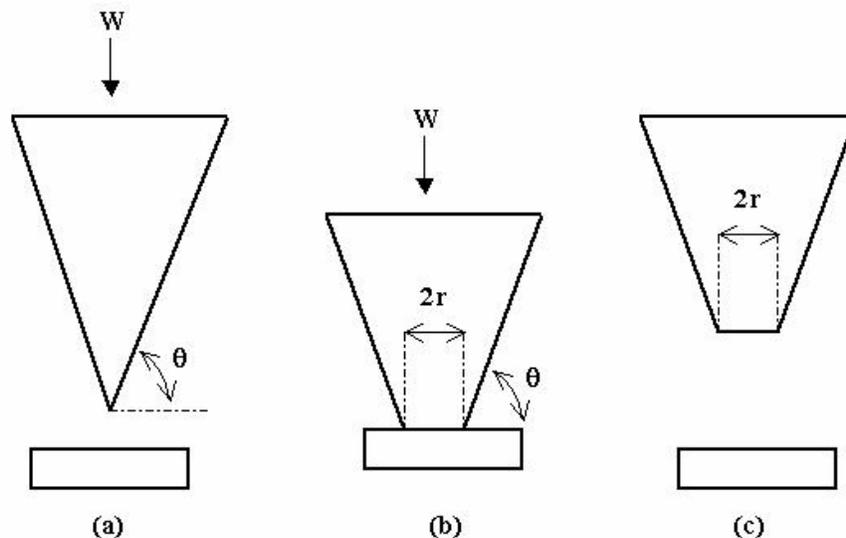


Figura 2.5 Esquema que representa una aspereza cónica que se deforma y desgasta por acción de una superficie plana. a) aproximación de la superficie plana; b) deformación de la aspereza cónica; c) la superficie plana se ha deslizado más allá del área de contacto, produciendo residuos de desgaste.

Se supone que las superficies que se deslizan primero hacen un contacto de diámetro $2r$ y después se desplazan para hacer contacto en otra parte, con el mismo diámetro, ya que la carga es constante; así el proceso continúa hasta que hayan tenido contacto todas las n asperezas. Ahora bien, si h_0 es la altura de la porción de una aspereza cónica que se ha eliminado, el volumen ΔV de metal perdido por aspereza es:

$$\Delta V = \frac{1}{3} \pi r^2 h_0 \dots (2.14)$$

Pero $h_0 = r \tan \theta$ y al sustituir esto en la expresión 2.14 resulta: $\Delta V = \frac{1}{3} \pi r^3 \tan \theta$.

Por lo que, el volumen eliminado por unidad de distancia de deslizamiento ΔV_0 es:

$$\Delta V_0 = \Delta V / 2r$$

$$\Delta V_0 = \frac{1}{6} \pi r^2 \tan \theta \dots (2.15)$$

Si se sustenta la premisa de que la superficie inferior se mueve a través de una distancia igual al diámetro $2r$ del área de contacto en relación a la superficie superior, el volumen desgastado por unidad de distancia deslizada debido a n asperezas será:

$$V = \sum_{r=0}^{n-1} \frac{1}{6} \pi r^2 \tan \theta = \frac{\tan \theta}{6} \sum_{r=0}^{n-1} \pi r^2 \dots (2.16)$$

Ahora, si $\sum_{r=0}^{n-1} \pi r^2$ es el área de contacto real A_t la cual corresponde a la ecuación 2.5, sustituyendo ésta en 2.16 resulta finalmente el volumen desgastado en función del ángulo de aspereza.

$$V = \frac{\tan \theta}{6} \frac{w}{\sigma} \dots (2.17)$$

La ecuación 2.17 es similar a la ecuación 2.13 en que el volumen de desgaste es directamente proporcional a la carga w e inversamente proporcional a la presión de flujo σ del metal que sufre el desgaste. El modelo es aplicable al desgaste por adherencia, o a lo que algunos autores denominaron desgaste mecánico. [4]

II.3.6. Razón de desgaste y coeficiente de desgaste.

La razón de desgaste es un valor que indica la cantidad de material que se ha desgastado por cada desplazamiento, en otras palabras; cuánto volumen de material se pierde en cada avance o recorrido, es decir, matemáticamente v/s .

La razón de desgaste se mencionó antes como:

$$\frac{v}{s} = \beta n_u g \dots (2.12)$$

Y de ésta partió la ley de desgaste por adherencia (expresión 2.13), en ésta se puede observar a la razón de desgaste v/s como lo indica la expresión 2.18:

$$v = \beta \frac{w}{3\sigma} s \dots (2.13)$$

$$\frac{v}{s} = \beta \frac{w}{3\sigma} \dots (2.18)$$

Es complejo el análisis de la razón de desgaste mediante el análisis de la ley del desgaste de adherencia, por ello es posible relacionar a la carga w con el factor 3σ , el primero con unidades de masa y el segundo con unidades de área, se convoca a la dureza cuya unidad es justamente de masa en área, además si el desgaste es inminente por la consideración principal de que la carga es directamente proporcional a la pérdida de volumen y como para que exista desgaste adhesivo debe haber carga, entonces la probabilidad $\beta = 1$; resultando lo siguiente:

$$\left(\frac{1}{w}\right)(H) \frac{v}{s} = (1) \frac{w}{3\sigma} (H) \left(\frac{1}{w}\right)$$

El lado derecho de la igualdad se le denomina como el *coeficiente de desgaste* K y esta en función del volumen perdido por la dureza del material en cada carga por desplazamiento, es decir:

$$\frac{H v}{w s} = K \dots (2.19)$$

En virtud de la ley del desgaste por adherencia, el coeficiente de desgaste K representa la probabilidad de que en un encuentro entre dos asperezas de las superficies en contacto se produzca una partícula de desgaste.

La razón de desgaste es una característica de suma importancia en ingeniería de diseño, pues determina qué tanta resistencia al desgaste presenta un material o un aditamento en el material o un recubrimiento, entre otros.

La razón de desgaste obtenida mediante análisis de desgaste adhesivo se interpreta de la siguiente manera:

☞ *Si la razón de desgaste presenta un valor cercano a cero indica que el material es muy resistente al desgaste.*

☞ *Si la razón de desgaste presenta un valor lejano del cero indica que el material no es muy resistente al desgaste.*

Si se supone una comparación entre dos materiales en donde el material A presenta una razón de desgaste $R_d = 2$ y el material B, una $R_d = 1.45$, es de comprender que el material B resiste más el desgaste que el material A. Pero se debe aclarar que ambos materiales fueron sometidos al mismo ambiente de desgaste y que los parámetros de cuantificación fueron los mismos.

El valor de la razón de desgaste es relativo según la aplicación deseada, por ejemplo, un elemento de máquina se debe desgastar más pronto que un elemento principal, la razón es que el elemento de máquina es de menor precio que el elemento principal. No obstante de que para otros tipos de aplicaciones es necesario que un material resista al desgaste.

II.3.7. Criterio para la selección del material.

Con objeto de prevenir el rayado y la adhesión de dos metales en contacto deslizante, sujetos a lubricación en los linderos, se han emitido dos criterios. El par deslizante deberá, primero estar formado por metales mutuamente insolubles, y segundo por lo menos uno de los metales deberá pertenecer al subgrupo B de la tabla periódica.

De esta manera parece ser que el par de metales que produciría el menor número de amarres y las adhesiones más débiles, será el más adecuado para las aplicaciones de deslizamiento. Con pocos amarres, el número de posibles puntos de rayado sería pequeño. Con adhesiones débiles la tendencia a la transferencia de metal y al trabajo de endurecimiento de las asperezas quedaría reducida al mínimo.

El razonamiento en que se basan estos dos criterios puede resumirse en dos enunciados básicos. La solubilidad mutua de los dos metales determinará el número probable de uniones que se forme. Las características de adhesión de los metales determinarán la resistencia de los amarres formados.

Se desea que uno de los metales en contacto deslizante alcance su temperatura de fusión debido a la presión y a la temperatura de fricción en la interface. Como la carga normal completa, más la presión debida al contacto de las asperezas paralelas al plano de deslizamiento, se aplican sobre un área relativamente pequeña de las asperezas, la presión local será bastante elevada. Esta condición, junto a la temperatura debida a la fricción en la interface, podría fácilmente ocasionar que la temperatura se elevase lo suficiente para fundir uno de los metales.

La condición anterior sería excelente para que ocurriera difusión en el caso de metales solubles. A medida que el metal se funde, la presión en esa pequeña zona va cediendo y las partes se moverán algo, ocasionando enfriamiento y solidificación. De esta manera existirá una unión sólida.

La difusión determinará cuántas ligaduras se forman y, por lo tanto, la resistencia total de éstas en la interface. Si se forma un compuesto intermetálico, en la mayoría de las combinaciones de metales prevalecerán enlaces covalentes, por lo que las ligaduras serán bastante débiles.

Los metales alcalinos, o del subgrupo A, tienen características metálicas definidas, tales como buena ductibilidad, maleabilidad, conductividad térmica y electrónica, y predominio de estructuras cristalinas compactas. Los metales del subgrupo B, por el contrario, muestran una disminución de estas propiedades, con un cambio básico de características metálicas a no metálicas respecto al lado derecho de la tabla periódica. Las estructuras de los cristales del subgrupo B son más complejas y menos compactas que las de los metales alcalinos.

II.3.8. Control del desgaste adhesivo.

Evidentemente, para controlar el desgaste es necesario controlar los factores que en él intervienen. Quizá el único factor que no se puede controlar es la adhesión de una pareja de metales, ya que ésta es una característica inherente del material.

En la generalidad de los problemas de ingeniería, los factores tales como la carga, distancia recorrida, velocidad y efectos ambientales, están determinados por requisitos funcionales de las partes; por lo tanto, los factores controlables restantes serían: dureza, acabado de la superficie y contaminantes.

La dureza requerida se obtendrá por aleación o por tratamiento térmico de los metales. El acabado de la superficie generalmente se hace por pulido, esmerilado y rectificado. La desventaja de estos métodos es el enclavamiento de abrasivos en la pieza trabajada. Un método para acabado de la superficie consiste principalmente en introducir una corriente mediante una herramienta de acabado, forzándola por una presión considerable contra la pieza en rotación. El punto de contacto es calentado por la corriente y las asperezas de la pieza son suavizadas por el calor y la presión aplicados. Las ventajas obtenidas son: un mejor acabado de la superficie y mayor dureza de la misma, acompañadas por una mejor resistencia al desgaste. [6]

Por lo que respecta a los contaminantes, la lubricación es el más común y, generalmente, el más económico de los métodos para controlar el desgaste. Sin embargo, cada vez con mayor frecuencia se emplean materiales en situaciones tales como las de instalaciones nucleares de potencia, donde las partes móviles que funcionan a altas temperaturas en atmósferas estrictamente controladas, a menudo

impiden la lubricación. En este caso se hace necesaria la introducción de películas de superficie benéficas.

Se emplea un gran número de métodos para controlar el desgaste, pero cada uno por sí solo es muy específico y tiene aplicaciones limitadas a la situación particular para la cual fue desarrollado. Pueden clasificarse en tres categorías principales:

1. *Principio de revestimientos protectores.* Esta categoría incluye protección por lubricantes, películas de superficie, pinturas, plateado, fosfatado y otros revestimientos químicos. Este principio es el más ampliamente usado.

2. *Principio de conversión.* Este principio entraña la conversión del desgaste destructivo en otro tipo permitido. Citemos como ejemplo la elección de un hierro fundido que, siendo más bien vulnerable al desgaste abrasivo, permite que los anillos de los pistones se desgasten rápidamente, disminuyendo con ello los riesgos de rayado lateral, pese al rápido desgaste.

3. *Principio de desviación.* El desgaste es desviado de la superficie económicamente más vulnerable, a otra superficie de contacto menos costosa. Este principio se caracteriza por el uso de materiales blandos y de bajo punto de fusión en cojinetes o chumaceras de manga o muñón, donde el desgaste es desviado de los muñones a las chumaceras.

Si el calor, la corrosión y la vibración son insignificantes, la elección probablemente será entre los aceros con carburos duros y quebradizos, los aceros martensíticos para los casos extremos; los aceros perlíticos o martensíticos para la escala intermedia, y entre los austeníticos cuando se necesita gran tenacidad. Si es necesaria la protección para pocas profundidades, la electroplastia, recubrimientos óxidos (anodizado) y los revestimientos por difusión son suficientes y económicos en la mayoría de los casos.

II.4. PRUEBAS DE DESGASTE ADHESIVO.

Se piensa erróneamente que para la realización de las pruebas de desgaste lo ideal es que se realicen en la máquina de proceso real y no en una máquina experimental, pero en el estudio de un nuevo material, un material recubierto o simplemente el conocimiento del comportamiento tribológico; es prescindible la utilización de un dispositivo experimental.

Aunque se cuenta con datos sobre el desgaste obtenidos en pruebas llevadas a cabo en máquinas reales, los estudios de laboratorio se realizan en condiciones controladas que simulan los movimientos observados en las situaciones reales. Con frecuencia, en la misma máquina se obtienen resultados sobre fricción y desgaste.

En muchas máquinas y dispositivos mecánicos se presenta el desgaste de tipo adhesivo, por lo que se ha logrado simular el fenómeno mediante el diseño de un par metálico que proporcione una interface de frotamiento.

Existen varias máquinas para evaluar el desgaste y los principios de operación de la mayoría de ellas es básicamente el mismo, pues se cuenta con el requisito de contar con un par metálico que proporcione una interface de frotamiento. Esto se hace fijando una espiga sobre una barra de carga, teniendo aquélla la forma de una varilla o un hemisferio, mientras que la barra de carga se diseña para soportar la carga normal.

Sin embargo, para el estudio del desgaste de tipo adhesivo, las máquinas donde se realizan las pruebas experimentales particularizan principios de funcionamiento que a continuación se muestran; destacándose el principio de “espiga sobre disco”:

1. Barra cargada sobre par cilíndrico.

La espiga (2) es empujada por una barra cargada (4) sobre un cilindro que gira (1) con calibradores de deformación y sensores montados sobre la sección reducida (3). Los sensores indican a una interface la cantidad de material removido mediante la prueba. [2]

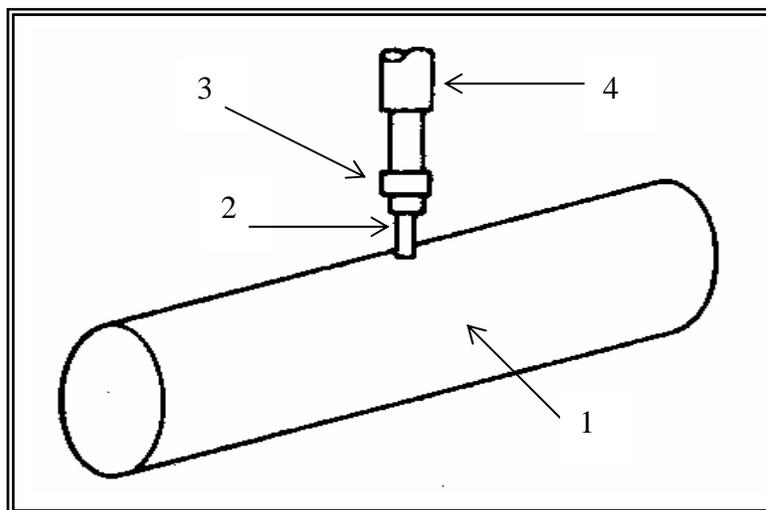


Figura 2.6 Barra de carga sobre cilindro rotatorio.

2. Espiga y buje.

La espiga (2), fija a una barra horizontal de carga (3) pasa por un buje rotatorio (1). La barra de carga está fija a un resorte (4) cuyo otro extremo está fijo a un soporte rígido (5). El arrastre ocasionado por la fricción hace que el resorte se estire.

Una aguja (6) fija al resorte se puede unir a un trozo de hierro suave suspendido en un campo magnético. La deflexión de la aguja debido a la fricción hará que el núcleo de hierro se mueva provocando un cambio en la fuerza del campo inducido. La señal resultante se puede amplificar y registrarse. [4]

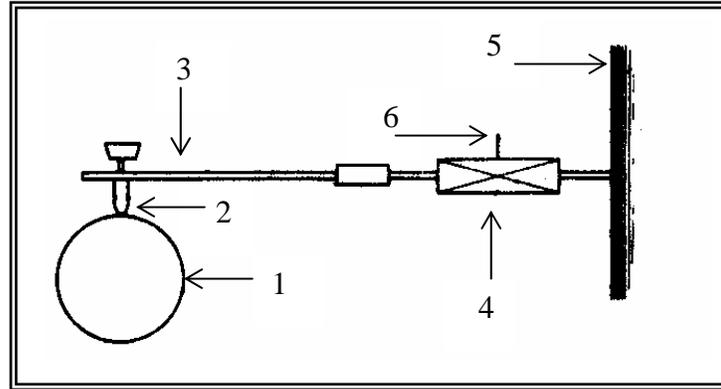


Figura 2.7 Máquina de espiga y buje.

3. Barra de carga con bisagra.

Se utiliza una espiga cónica que se monta sobre una barra de carga con bisagras. Se hace correr la espiga y después de detener la máquina, la barra de carga se corre haciéndola oscilar 180° y se mide a través de un microscopio; el diámetro de la huella de desgaste de manera que, sabiendo el ángulo del cono, se puede calcular la pérdida de volumen.

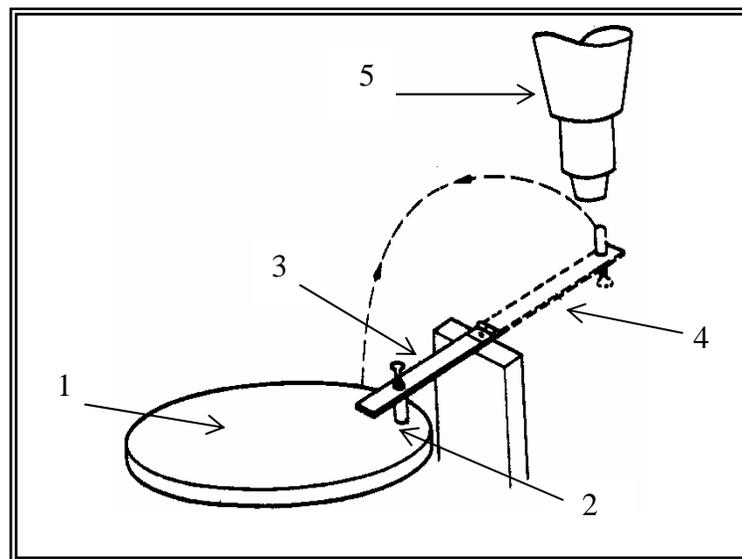


Figura 2.8 Barra de carga con bisagra. (1) Disco; (2) Espiga; (3) Barra de carga; (4) barra de carga desplazada 180° para medir la huella del desgaste por medio de un microscopio (5).

4. Espiga sobre disco

La máquina de espiga sobre disco o “pin on disk” es un aparato muy usado para pruebas de desgaste. La espiga es un cilindro montado de forma normal y es presionado bajo una carga sobre una superficie plana de un disco de acero en rotación. Las variables son la carga normal, la velocidad de deslizamiento, la atmósfera y la temperatura ambiente, variando éstas según el tipo de parámetros a obtener. La cantidad de desgaste puede establecerse pesando la espiga en una microbalanza. Una prueba de desgaste completa requiere el registro de la pérdida de peso en relación con los intervalos de deslizamiento o bien alternando el tiempo en función de la carga o la velocidad para obtener el desgaste inicial durante el arranque y en el estado estacionario.

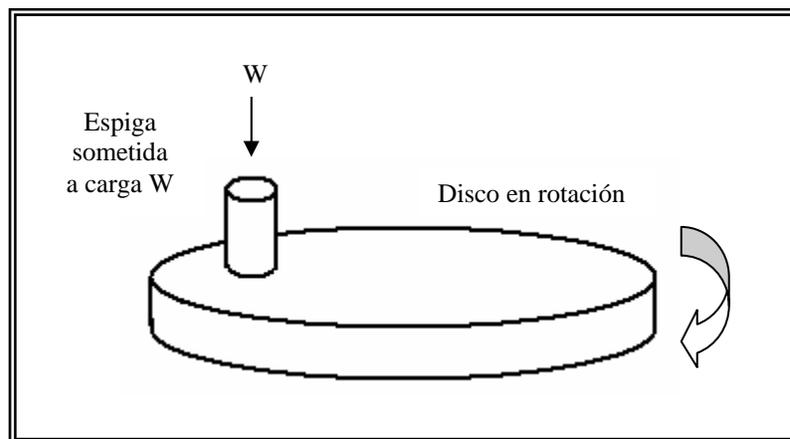


Figura 2.9 Esquema del principio “espiga en disco”.

Para la realización de este trabajo las pruebas de desgaste se realizarán en una máquina que opera bajo el principio “espiga en disco”.

II.4.1. Análisis metalúrgico.

La textura de la superficie es un parámetro importante y la topografía de las superficies y el uso de un perfilómetro para registrar las crestas y los valles de la misma. Sin embargo, la superficie previa de un metal continúa cambiando como resultado de la deformación y el desgaste y esto se puede observar por medio de un microscopio óptico, electrónico o de barrido (SEM). Es importante observar la naturaleza de la subsuperficie además de la observación microscópica, las técnicas de microdureza o difracción de electrones proporcionan valiosa información. Los metales diferentes que están en contacto bajo frotamiento pueden formar compuestos intermetálicos produciéndose un cambio en la composición de la superficie o inmediatamente debajo de ésta.

Para determinar la composición química que también puede verse modificada como resultado de la oxidación, es muy útil efectuar un microanálisis en las secciones cónicas de las espigas. Los residuos del desgaste con frecuencia se someten al análisis de difracción con rayos X para obtener información respecto a la interacción metalúrgica entre los miembros de un par metálico.

II.4.2. Análisis gráfico.

Cada vez que se investiga la resistencia al desgaste de un material, la primera fase del trabajo consiste por lo general en una evaluación de la cantidad de desgaste al incrementarse la distancia de deslizamiento. Al determinar la pendiente del desgaste estacionario (constante), el siguiente paso es graficar la razón de desgaste contra la carga.

Cuando la carga es baja, el régimen de desgaste es moderado, seguido por un régimen de transición cuando la razón de desgaste aumenta algunos órdenes de magnitud. Por lo general los investigadores no se detienen aquí sino que siguen incrementando la carga hasta obtener una curva completa de la cantidad de pérdida de peso en relación con la carga. Sin embargo, no se espera que una máquina trabaje en condiciones que excedan el régimen de desgaste moderado. Esto no quiere decir que no sea importante conocer la carga de transición, pero las investigaciones, aclarando que según el tipo de estudio, deben concentrarse en el mecanismo del desgaste moderado y del desgaste en el arranque inicial para proporcionar información a los ingenieros de diseño.

Se ha encontrado que la industria generalmente desea conocer el comportamiento resistivo de un material mediante la inspección de gráficas cuyos parámetros de desgaste sean la carga en un periodo mientras que en segundo lugar los parámetros de desgaste son el desplazamiento en un periodo. [4]

Es racional que en un material la pérdida de masa o volumen es directamente proporcional a la carga empleada y al tiempo de aplicación. Por lo que gráficamente *se deben esperar curvas de pendiente positiva, en donde la pendiente tenderá a tener mayor avance que altura, además de que al término de la altura máxima la curva presentará un comportamiento exponencial.* [2]

Por ejemplo, las siguientes gráficas obtenidas experimentalmente confirman el razonamiento anterior:

1. Acero contra acero.

Aquí se puede notar que al inicio hay un recta de pendiente positiva y que al final de la altura máxima se cambia a una trayectoria exponencial.

El recorrido 1 es la curva correspondiente a la pérdida de masa en función del tiempo, mientras que el recorrido 2 es la pérdida de masa en función del logaritmo de la distancia desplazada. Se colocan ambas curvas para citar que durante la combinación de parámetros, el comportamiento de la curva de desgaste siempre será semejante.

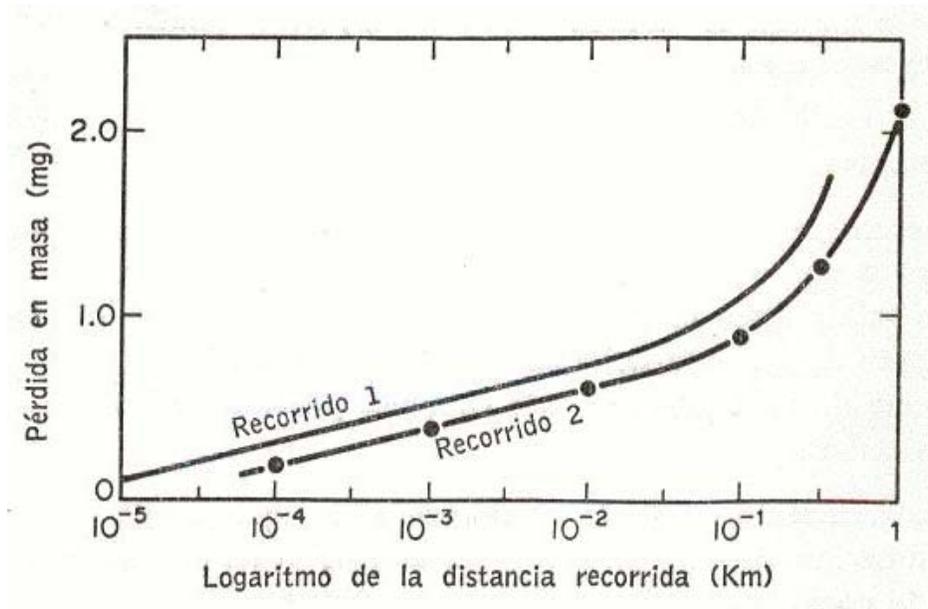


Figura 2.10 Comportamiento general del desgaste en el acero contra acero a 100 Kg/cm^2 .

2. Aluminio puro sobre disco de acero para herramienta.

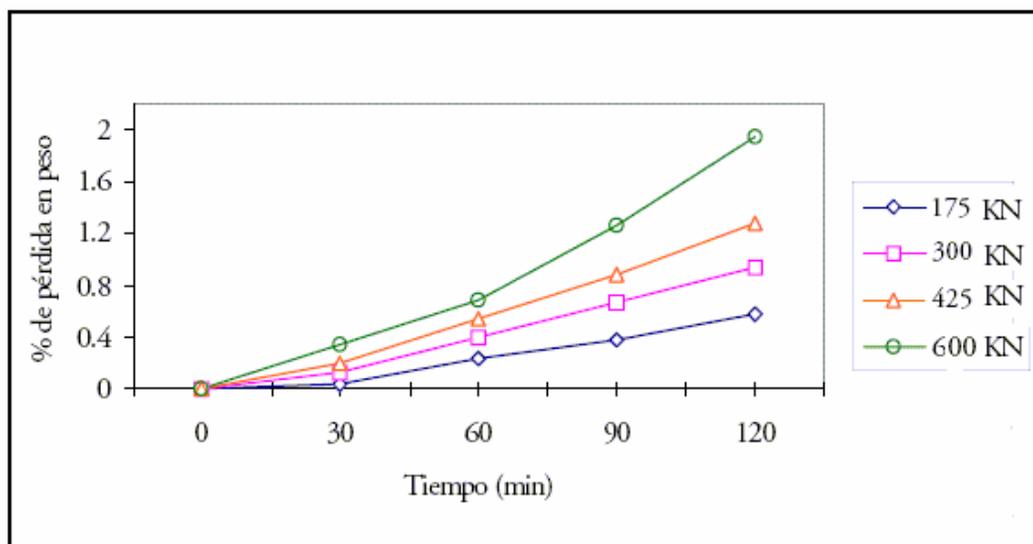


Figura 2.11 Resistencia al desgaste del aluminio puro a diferentes cargas.

3. Aluminio (Al – 356) sobre disco de acero para herramienta.

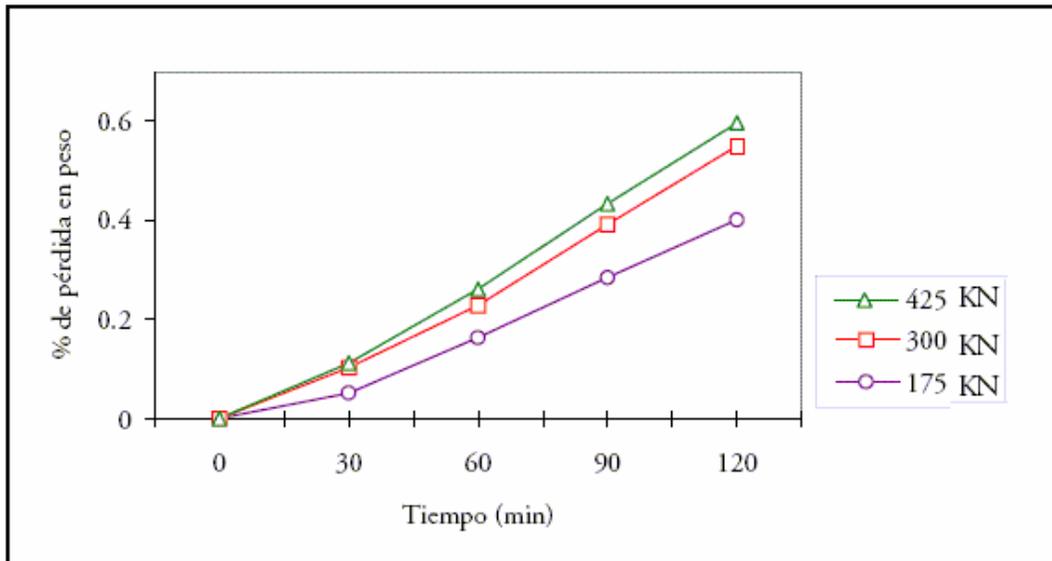


Figura 2.12 Resistencia al desgaste del aluminio Al 356 a diferentes cargas.

En la gráficas 2.11 y 2.12 se puede notar que efectivamente al inicio de la curva hay una recta de pendiente positiva y aumenta la cantidad de rectas con tendencia a una trayectoria exponencial. Asimismo nótese que a mayor carga aplicada, conforme transcurre el tiempo; más peso se pierde.

Existen para diversos materiales muchas gráficas de desgaste, todas tienen el comportamiento antes enunciado y solamente se mostraron tres figuras para argumentar lo que posiblemente suceda en este trabajo.

Aunque hay gráficas que contemplan a la razón de desgaste, esta última se le ha preferido analizar como un valor indicativo y de comparación, de igual caso para el coeficiente de desgaste; ya que estos últimos son considerados primordialmente para la preparación de tablas y no necesariamente para la elaboración de gráficas, no obstante de que industrialmente la designación anterior es totalmente relativa. [6]

Cabe mencionar también que se eligieron como ejemplo las gráficas de aluminio por la analogía que presenta con el Zinalco con respecto a la consideración de materiales para recubrimiento de acero.

II.4.3. Estudio comparativo.

Con frecuencia hay una discrepancia aparente entre los estudios teóricos y experimentales sobre la razón de desgaste en metales y materiales y en la aplicación de estos resultados a las situaciones industriales. Esto no es necesariamente así y lo que se busca es que haya concordancia entre ambos criterios.

En el desgaste de tipo adhesivo es primordial conocer la cantidad de pérdida de peso, ya sea teniendo como variable independiente al tiempo o al desplazamiento, graficar datos y analizar visualmente entre diversas pruebas y éstas con condiciones específicas, ha resultado ser una magnífica comparación de resultados. Empero de que las gráficas dicen mucho, en ocasiones un solo valor puede determinar la resistencia al desgaste de un material. Dicho valor es conocido como la “razón de desgaste”. Sin pasar por alto que también es útil conocer el valor del coeficiente de desgaste K durante la comparación entre materiales.

La comparación elementalmente se aplica a:

- ☞ Un material mejorado con respecto a ese mismo material antes de la mejora.
- ☞ Un material tratado química o físicamente con respecto a ese mismo material sin ser tratado.
- ☞ Un material recubierto con respecto a ese mismo material sin recubrir.
- ☞ Entre dos o más materiales distintos.
- ☞ Un material transformado con respecto a ese mismo material sin transformar.

Los términos de comparación se pueden precisar como en el cambio de volumen y masa, en algún proceso de transformación mecánica, el tipo de material; un metal o un polímero o un material compuesto, recubrimientos metálicos o películas protectoras.

Sin embargo en ciertos sectores profesionales existe un escepticismo comprensible respecto a aprovechar los datos de laboratorio para el trabajo de diseño cuando se utilizan estudios simulados con máquinas simuladoras de desgaste, cuyo principio de funcionamiento ya fue descrito, pero para evitar la duda se desarrolló el concepto de la comparación gráfica con el que se pretende obtener un criterio específico que se pueda aplicar al trabajo de diseño.

Otra objeción que se hace es que los estudios de desgaste en laboratorio son pruebas aceleradas, pero lo mismo puede decirse de las pruebas de fluencia lenta y fatiga en metales, y éstas han proporcionado mucha información útil a los ingenieros de diseño. [2]

Para ejemplificar la comparación gráfica, se citan las gráficas 2.11 y 2.12 de la resistencia al desgaste de aluminio puro y del aluminio Al – 356, surge una gráfica comparativa para interpolar visualmente, claro; respetando escalas y variables físicas.

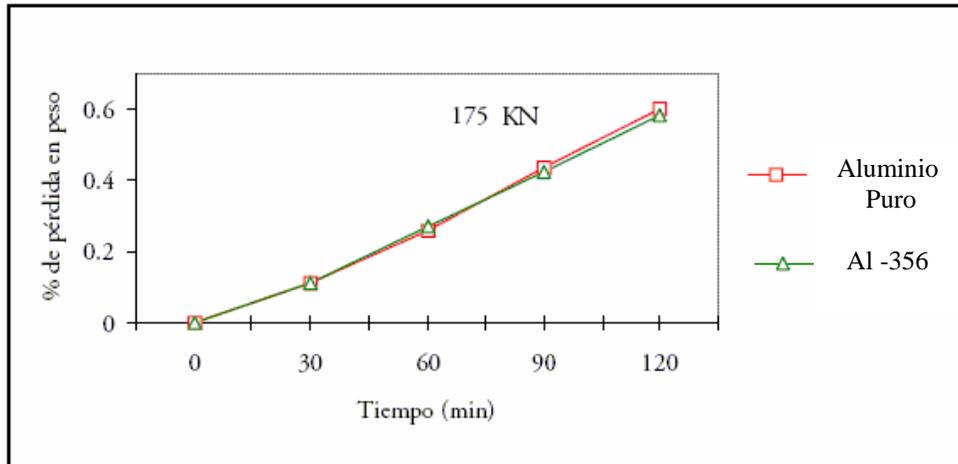


Figura 2.13 Resistencia al desgaste del aluminio puro y del Al 356 en una sola gráfica.

Observando la gráfica comparativa de la resistencia al desgaste entre el aluminio puro y el Al – 356, resulta que para una carga de 175 kN la pérdida de peso es prácticamente la misma para dos tipos de aluminio, entonces en este caso se deben realizar más gráficas con diversas cargas, porque con base en la gráfica anterior un solo dato de carga no es claro y es en este caso cuando la comparación no es fidedigna o presenta una mayor incertidumbre.

Por lo anterior con las gráficas comparativas, es necesario apoyar el argumento de las gráficas con los valores de la razón de desgaste o el coeficiente de desgaste según el caso a elegir, ya que se recuerda que el coeficiente de desgaste surge de la razón de desgaste. El conocer dichos valores es valioso porque proporciona datos para casos individuales.

En el desgaste, en este caso el de tipo adhesivo, para conocer el coeficiente de desgaste K y la razón de desgaste R_D se tienen que considerar los siguientes aspectos durante la realización de los ensayos o pruebas experimentales:

Tipo de variables:

1. Propiedades del material.
2. Propiedades de la prueba.

Propiedades del material.

- Dureza del material: H [Kg/cm²]
- Densidad del material: ρ [Kg/cm³]
- Volumen de desgaste: V [cm³]

Propiedades de la prueba.

- Velocidad: v [rpm]
- Carga axial: L [Kg]
- Incremento de tiempo: Δt [s]
- Distancia de deslizamiento: S [cm]

1. Ecuación utilizada para el cálculo del coeficiente de desgaste.

$$K = \frac{VH}{LS} \dots (2.20)$$

$$K = \frac{V [cm^3] H [Kg / cm^2]}{L [Kg] S [cm]} = \frac{[cm Kg]}{[Kg cm]} = [adimensional]$$

2. Ecuación utilizada para conocer el volumen de desgaste.

Para saber la cantidad de volumen desgastado se deberá conocer la densidad del material de la probeta en estudio así como la obtención de los pesos inicial y final de ésta.

$$\Delta P = (P_i - P_f) [Kg] \dots (2.21)$$

$$V = \frac{\Delta P}{\rho} \dots (2.22)$$

$$V = \frac{\Delta P [Kg]}{\rho [Kg / cm^3]} = [cm^3]$$

3. Ecuación utilizada para conocer la distancia de deslizamiento.

$$S = v \phi \pi \Delta t \dots (2.23)$$

$$S = (v[rpm]) (\phi [cm])(\pi) (\Delta t [min]) = [cm]$$

En donde: ϕ es el diámetro en el que se encuentran las muestras cuyo centro es el eje de giro del disco, π es la constante de valor 3.1416

4. Cálculo de la razón de desgaste.

$$R_D = \frac{K L \rho}{H} \dots (2.24)$$

$$R_D = \frac{K L \rho}{H} = \frac{K[1] L[Kg] \rho[Kg / cm^3]}{H[Kg / cm^2]} = \left[\frac{Kg}{cm} \right]$$

Simplificando la expresión 2.24 sustituyéndole la ecuación 2.20 de K .

$$K = \frac{V H}{L S} \dots (2.20)$$

$$R_D = \left(\frac{V H}{L S} \right) \frac{L \rho}{H} \dots (2.24)$$

$$R_D = \frac{V \rho}{S} \dots (2.25)$$

Con las ecuaciones 2.20 y 2.25 se conocerá el coeficiente de desgaste y la razón de desgaste respectivamente.

Ahora, la pérdida de peso se expresa en porcentaje de pérdida de peso; no es usual que sea pérdida de masa o de volumen.

$$\%PP = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100\% \dots (2.26)$$

Finalmente, las gráficas tienen como variable dependiente a $\%PP$ y como variables independientes al tiempo Δt , con variaciones de carga axial L o en ocasiones a la velocidad v , siendo este último poco usual.

Pueden concebirse gráficas con 2.20 ó 2.25, pero como se ha explicado; sólo son de mayor utilidad los valores que las gráficas.

Bastaría complementar el estudio comparativo con un análisis metalográfico (durezas, micrografías, etc.) del *antes* y *después*.

GENERALIDADES DEL ZINALQUIZADO.

Se le denomina “zinalquizado” al proceso de recubrimiento de un metal (material base) con aleación Zinalco (recubrimiento). La designación es independiente al tipo de proceso de recubrimiento metálico que se lleve a cabo.

III.1. ZINALCO.

El Zinalco es una aleación formada por tres metales: Zinc, Aluminio y Cobre. Al unirse crean un material con mejores y nuevas características superadas a las de sus componentes originarios.

El Zinalco es una aleación eutectoide de Zinc-Aluminio (Zn-Al) pero modificada con cobre, esta adición de cobre le incrementa su ductilidad de tal manera que tiene un comportamiento superplástico a temperatura ambiente.

La ubicación del Zinalco debe ser dentro de la categoría denominada “nuevos materiales”, destacando que sus capacidades y características de desarrollo son las propias de un material para diseño.

Se le llama Zinalco porque es una palabra compuesta por las primeras letras de los metales componentes: Zinc, Aluminio y Cobre.

La composición química del Zinalco es la siguiente:

Zn – 75%
Al - 22%
Cu - 3%

III.1.1. Historia.

A raíz de estudiar las propiedades de dos materias primas nacionales el cobre primero entre 1972 y 1976 y el zinc después a partir de 1977, se logró elaborar un nuevo material que brindó la oportunidad de encontrar nuevos campos de desarrollo.

La aleación llamada Zinalco fue desarrollada en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, los estudios se comenzaron en 1973. Se inició con la idea de buscar un nuevo material que compitiera contra los plásticos, con la cualidad de tener una relación peso resistencia mecánica casi iguales, la densidad fue disminuida con aluminio y las propiedades mecánicas se ajustaron con la adición del cobre.

Pero fue hasta 1978 cuando se inició en el Instituto de Investigación en Materiales de la UNAM, un programa de investigación favorecido por la Organización de los Estados Americanos (OEA), sobre el zinc y sus aleaciones con el objeto de desarrollar nuevos campos de aplicación para este metal, del cual México es un productor a nivel mundial, y así evitar su desplazamiento por los plásticos y el aluminio.

Para obtener el Zinalco, el doctor Gabriel Torres Villaseñor y el grupo de trabajo del Departamento de Metalurgia y Cerámicos de Instituto de Materiales, investigaron alrededor de ocho años. Los resultados de dichas investigaciones condujeron al desarrollo de la aleación Zinalco, la cual, además de tener aplicaciones en la rama de la fundición, también puede incursionar en el campo de la extrusión, la forja y la laminación, por citar algunos.

Esto permite que el Zinalco resulte altamente competitivo, en comparación con aleaciones de cobre, aceros inoxidable y latones, según se explica en un informe del grupo Falmex-Galvotec, única empresa que decidió arriesgar su capital en un proyecto conjunto con la UNAM, encaminado a ensayar las aplicaciones del Zinalco en la industria [3].

En 1984 el grupo Falmex-Galvotec inició el desarrollo industrial de esta nueva aleación ahora disponible por la industria.

Por último, la empresa fabricante de automóviles Toyota, está interesada en la posibilidad del uso del Zinalco en la producción de piezas automotrices [3].

III.1.2. Características, propiedades físicas y mecánicas.

Se caracteriza el Zinalco por su densidad que es de $5.4 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ lo cual lo hace 31% mas ligero que el acero cuya densidad es del $7.8 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, sin embargo pesa el doble que el aluminio que tiene una densidad de $2.7 \text{ [g/cm}^3\text{]}$.

La combinación con el aluminio hace que la densidad del zinc se reduzca hasta un 35% resultando ser más ligero que el hierro y el acero. Adicionalmente, el material desarrolla un óxido protector que impide su posterior oxidación. Por otro lado, la presencia del cobre en la aleación beneficia las propiedades mecánicas; ya que tanto su dureza como su esfuerzo de cedencia en compresión se ven mejorados.

El Zinalco tiene alta resistencia a la corrosión atmosférica, por lo que es útil para cualquier configuración arquitectónica y estructural ya que el material posee la resistencia a la corrosión del zinc. Es ligero como el aluminio, resistente como el acero estructural y mejores propiedades mecánicas.

El Zinalco puede ser inyectado en estado cuasi líquido, entre los 440 y 480 °C o totalmente líquido arriba de los 480 °C. Se puede inyectar, permitiendo la fabricación de piezas elaboradas en otros materiales y se puede eliminar los pasos de transformación y ensamble. [8]

En la siguiente tabla se presentan las propiedades físicas del Zinalco.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL ZINALCO	
<i>Temperatura de fusión</i>	421 °C a 481 °C
<i>Densidad</i>	5.4 gr/cm ³
<i>Módulo elástico</i>	110-130 Gpa
<i>Conductividad eléctrica</i>	37 % del Cu.
<i>Conductividad térmica</i>	37 % del Cu.
<i>Coefficiente de expansión térmica</i>	25 μ m/mm Kx10 ⁶
<i>Color</i>	blanco grisáceo

Tabla 3.1. Propiedades físicas del Zinalco. [9]

En cuanto a sus propiedades mecánicas se puede decir que su resistencia mecánica es semejante a la de un acero bajo en carbono, esta característica lo hace estar entre los metales con buena resistencia a la corrosión confirmando así esta última característica.

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ZINALCO				
	<i>Fundición en arena</i>	<i>Inyectado</i>	<i>Extruido 270 °C a 300 °C</i>	<i>Laminado</i>
<i>Resistencia a la tensión</i>	290 - 300	310 - 320	380 - 410	270 - 290
<i>Esfuerzo de cedencia (MPa)</i>	280 - 300	290 - 310	280 - 320	300 - 310
<i>Deformación máxima (%)</i>	3 - 5	8 - 10	30 - 35	80 - 100
<i>Dureza (Rb)</i>	50 - 55	60 - 65	40 - 55	25 - 30

Tabla 3.2. Propiedades mecánicas del Zinalco. [9]

Se puede explicar mediante comparación que las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión del zinalco son superiores a las del aluminio 380, latón o hierro de fundición. Asimismo de acuerdo a sus propiedades mecánicas y de resistencia, piezas como de latón, hierro o bronce que generalmente se funden individualmente en moldes pueden ser sustituidas por Zinalco moldeado por inyección presentando las siguientes cualidades:

- Menor consumo de materia prima.
- Menor gasto de energía.
- Utilización de moldes menos costosos.
- Menores costos por procesos adicionales (anticorrosivos, soldaduras, pintura).

Microestructura del Zinalco.

En la microestructura del zinalco se puede observar que está compuesta básicamente de dos fases, la fase alfa, que es aluminio con menos del 1 por ciento de zinc disuelto y la fase beta, que es zinc con menos de 0.5 por ciento de aluminio disuelto pero en las dos fases existe una cierta cantidad de cobre.

Para obtener la forma geométrica de las fases dependerá de la trayectoria que se siga durante el enfriamiento de la aleación y esta deberá tener una temperatura mayor a 280 °C pero menor a 420 °C, que es en donde la aleación zinalco tiene una estructura atómica semejante a la del aluminio (Cúbica de cara centrada). Si se enfría rápidamente la estructura estará formada por granos finos de la fase alfa y beta, de lo contrario, si el enfriamiento es lento las fases alfa y beta se ordenarán en formas de láminas alternadas dando una estructura perlítica semejante a la de los aceros.

Las dos principales microestructuras que pueden presentarse en el Zinalco son: perlita y granos finos, proporcionan una gran gama de propiedades mecánicas, las cuales se han resumido en la tabla 3.2.

Superplasticidad del Zinalco.

El término "superplasticidad" ha sido usado para describir la capacidad de un metal para estirarse sin fracturas en varios cientos de por ciento. Como un ejemplo, el aluminio sin aleantes tan sólo se estira un máximo de 80 por ciento.

El Zinalco presenta características "superplásticas" por la singularidad en el manejo de sus componentes.

Se aplica al fenómeno que se presenta en algunos materiales metálicos o cerámicos a cierta temperatura a la cual pierden casi la totalidad de su resistencia mecánica. El resultado es que al estirarlos a esa temperatura, alcanzan deformaciones que superan el 100 por ciento, como si fueran plásticos.

Se sostiene que el mecanismo que origina la superplasticidad es el deslizamiento de un grano del metal sobre otro, al estirarlo.

Las aleaciones superplásticas que más futuro tienen son las basadas en los metales más abundantes en la corteza, como el hierro y el aluminio, sin embargo, las más sencillas de fabricar y con propiedades semejantes al acero estructural son las basadas en el eutectoide zinc-aluminio como el Zinalco.

Las aleaciones *Al7075* y *Supral37* permiten deformaciones de hasta 1000 por ciento a los 510° C., la aleación *Zn-22al* logra deformaciones de hasta 3000 por ciento a los 200° C. El *Zinalco* puede deformarse hasta en un 500 por ciento encima de los 350° C.

III.1.3. Procesos de transformación.

Son cuatro los procesos de transformación usados para el Zinalco, son típicos en la ingeniería de manufactura y a continuación se enuncian:

Fundición. Utilizado los procesos por molde de arena, molde permanente, por gravedad o por inyección a baja presión, sustituye al hierro gris, aluminio, bronce y latón.

Inyección. El zinalco es el único material en el mercado que, contando con una resistencia similar a la del acero, se puede inyectar, permitiendo de esta manera la fabricación de piezas elaboradas en otros materiales, y eliminando pasos de transformación y ensamble.

Extrusión. No requiere de instalaciones especiales, pudiéndose utilizar los mismos equipos empleados para extruir aluminio, las barras y soleras constituyen un material inmejorable por su excelente maquinabilidad.

Laminación. La principal cualidad que presenta la lámina de zinalco es su resistencia a la corrosión, así como la posibilidad de deformarse utilizando la propiedad de ser superplástico.

III.1.4. Aplicaciones.

La aleación Zinalco presenta diversas aplicaciones dada su posibilidad de ser convertida mediante procesos convencionales de transformación; tanto por procesos de fundición como por procesos de deformación plástica, esto gracias a sus características físico-químicas y mecánicas; lo cual es adecuado para la fabricación de diversos productos permitiendo que su empleo se extienda a diversas aplicaciones cotidianas: desde tubos y engranes, hasta carrocerías para automóviles.

El uso del Zinalco representa una alternativa para la fabricación de piezas en las que tradicionalmente se ha utilizado zamak, aluminio, bronce, latón, hierro gris e incluso acero.

Las principales aplicaciones del Zinalco podrían ser:

- ❖ Perfiles arquitectónicos para intemperie
- ❖ Perfiles para ventanas
- ❖ Fabricación de piezas automotrices
- ❖ Componentes para torres eléctricas de transmisión
- ❖ Productos laminados para la construcción
- ❖ Elementos para cerrajería
- ❖ Punteras negativas para el Sistema de Transporte Colectivo Metro

A continuación se precisarán algunos elementos producidos con Zinalco.

Las punteras negativas para el Sistema de Transporte Colectivo, como esas piezas friccionan contra los rieles su desgaste obliga a cambiarlas constantemente, antes se fabricaban con una aleación de cobre muy cara. La pieza de zinalco es 30% más económica y con ella se surte el 50% del consumo total. Logrando así el Sistema de Transporte Colectivo un ahorro anual de 400 000 pesos aproximadamente. [3]

La maquinabilidad del zinalco es excelente, esta propiedad le permite encontrar una gran variedad de aplicaciones, como la correspondiente a diseños para porta muestras de microscopio electrónico, en el cual protagoniza también un papel importante su baja resistencia eléctrica.

Los tornillos fabricados con esta aleación tendrán la propiedad de alta resistencia a la corrosión y no formar par galvánico ni con el aluminio ni con el acero, pudiéndose utilizar tanto en torres eléctricas como en el ensamble de ventanas. [3]

La posibilidad de producir perfiles arquitectónicos con Zinalco abre una nueva perspectiva a la arquitectura e ingeniería ya que estos perfiles tienen una alta resistencia mecánica y pueden ser soldados para la fabricación de naves para bodegas o nuevas formas de ventanas. La lámina de Zinalco podría aplicarse a la fabricación de muebles de cocina, con la ventaja de resistir la corrosión.

Ya que como el Zinalco es una aleación que en la actualidad se está estudiando detalladamente aunada en diversas aplicaciones, en este caso; acero recubierto con Zinalco. Se enlistan de forma general algunas ventajas de esta nueva aleación:

- ✓ Requiere de baja energía para ser procesado, de hecho la extrusión, la forja y la fundición consumen menos energía que con cualquier otro metal.
- ✓ Alto grado de limpieza en su proceso al grado de no requerir equipo anticontaminante.
- ✓ Insuperable fluidez, mejor aún que el aluminio y el cobre.
- ✓ Alta resistencia mecánica, comparable a la de un acero de bajo carbono.

- ✓ Menor costo que el bronce.
- ✓ Su alta resistencia mecánica permite diseñar piezas más delgadas que pueden abatir el precio del aluminio.
- ✓ Buena resistencia a la corrosión, comparable a la del aluminio.
- ✓ Las áreas de aplicación de este material empiezan a crecer rápidamente reemplazando al hierro, bronce, aluminio y plástico.

III.2. CONCEPTO DE RECUBRIMIENTO METÁLICO.

Para comprender el proceso de Zinalizado es necesario comentar el concepto del recubrimiento metálico, el cual es una capa de metal relativamente delgada (en este caso, el Zinalco) que recubre a otro material de sección relativamente elevada (en este caso, el acero).

Los recubrimientos metálicos se aplican para lograr alguna propiedad superficial deseada que no tiene el metal base. Los aspectos influyentes en la tecnología de recubrimientos metálicos es, dar más vida al material una vez recubierto. Siendo algunos factores importantes los siguientes:

- ☞ La composición del recubrimiento.
- ☞ La estructura del recubrimiento.
- ☞ Su porosidad y adherencia.
- ☞ La temperatura de trabajo del material a recubrir.
- ☞ La compatibilidad en general entre los materiales.
- ☞ La disponibilidad del material con que se va a recubrir.
- ☞ Costo del proceso del recubrimiento.

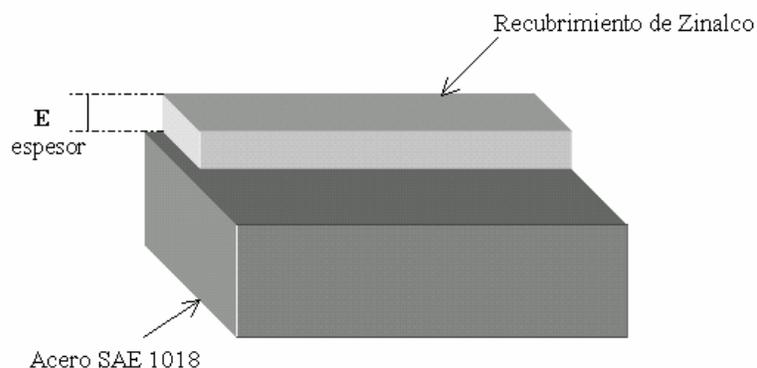


Figura 3.1. Esquema de un recubrimiento metálico.

En general las propiedades del conjunto vendrán determinadas por las del material predominante y el recubrimiento sólo tendrá marcada influencia sobre las propiedades de superficie como son:

- ☞ Proporcionar protección contra la corrosión al metal base.
- ☞ Aumentar la resistencia al desgaste y reducir la fricción de la superficie.
- ☞ Mejorar el aspecto del producto proporcionando ya sea en color o textura especificados.
- ☞ Mejorar la conductividad eléctrica.
- ☞ Aumentar la resistencia eléctrica.
- ☞ Preparar una superficie metálica para un proceso posterior.
- ☞ Reconstruir las superficies gastadas o erosionadas durante el servicio.
- ☞ Aumentar la capacidad de unión por procesos de soldadura.
- ☞ Incrementar la resistencia al calor.

Los recubrimientos con metales no ferrosos tienen especial aplicación en la protección de otros metales, especialmente acero, en algunos medios corrosivos. La combinación de un metal base resistente mecánicamente y un recubrimiento resistente a la corrosión forma un sistema de gran importancia en la industria.

Los principales procesos para recubrir metales son:

- ☞ Metalización por proyección térmica.
- ☞ Recubrimientos por electrodeposición.
- ☞ Recubrimientos por conversión.
- ☞ Recubrimientos por deposición física a partir de la fase vapor.
- ☞ Recubrimientos por deposición química a partir de la fase vapor.
- ☞ Chapeado.
- ☞ Cementación.
- ☞ Inmersión en caliente.

Como se nota, existen diversos procedimientos para lograr recubrir el acero con zinalco, sin embargo en este trabajo se realizará Zinalquizado únicamente mediante el proceso de inmersión en caliente.

III.3. INMERSIÓN EN CALIENTE.

La inmersión como tal, es sumergir un objeto en un líquido. Sin embargo, en ingeniería de materiales se constriñe a la idea de moldeo por inmersión, revestimiento por inmersión en caliente y revestimiento por inmersión en frío.

El moldeo por inmersión es un método que básicamente consiste en sumergir un molde (de metal, porcelana o vidrio) precalentado a 100-130 °C en un plastisol durante un corto período de tiempo y gelificar la capa de pasta depositada en su superficie.

El revestimiento por inmersión en caliente es un proceso en el cual un material metálico se sumerge en un baño fundido de un segundo metal; tras la remoción, el segundo metal recubre al primero.

El revestimiento por inmersión en frío es una técnica utilizada principalmente en la fabricación de guantes con o sin soporte textil. El guante tejido se coloca en el molde frío con forma de mano y luego se sumerge dentro del plastisol. Se deja escurrir el exceso de pasta y el molde se introduce en el horno de gelificación.

Inmersión en caliente.

La inmersión en caliente es uno de los métodos más antiguos para lograr recubrir un metal con otro y todavía hoy se utiliza ampliamente, puesto que es de los procesos de recubrimiento que consigue mayor adherencia y su aplicación resulta más barata. El recubrimiento se forma en la superficie del metal base cuando éste se sumerge en un baño de metal protector fundido.

Por inmersión en caliente se consiguen espesores de recubrimiento relativamente gruesos, entre 0.01 y 0.1 mm., aunque en algunos casos, como en el aluminizado, se llegan a espesores de más de 0.2 mm. Los metales usados para este tipo de recubrimiento han de tener bajos puntos de fusión, para evitar cambios térmicos en el metal base. Los más indicados son: zinc, estaño, plomo y aluminio.

El recubrimiento obtenido por inmersión en caliente consiste en una capa interna de aleación y otra capa externa de metal puro. La formación de la capa aleada da lugar a que la adherencia recubrimiento-sustrato sea en general muy elevada. La capa de aleación se forma por difusión del metal fundido dentro del metal base y consiste en un intermetálico metal protector metal base. La capa exterior de metal puro se forma a partir del metal líquido que se adhiere a la superficie de la pieza cuando ésta se extrae del baño. En general el espesor del recubrimiento se puede variar mediante el control del tiempo de inmersión, de la temperatura del baño, de las velocidades de inmersión y de extracción, de la velocidad de enfriamiento y de la composición química del baño. Las propiedades a considerar en la calidad de un recubrimiento son: espesor medio, uniformidad del espesor de la capa, adherencia y ductilidad. Solamente podrán obtenerse recubrimientos satisfactorios con una correcta preparación de la superficie a recubrir, adecuado tiempo y temperatura del tratamiento y gran pureza del metal protector.

III.4. ZINALQUIZADO.

Son pocos los estudios realizados relativos a la generación de recubrimientos con zinalco, no existe ningún antecedente con relación al desgaste, ya que esto no se ha realizado con anterioridad se pretende llevar a cabo el recubrimiento de acero con zinalco, ya que éste cuenta con un gran porcentaje de Zinc, del cual México es gran productor y se reporta esta aleación como un material con buena resistencia a la corrosión.

Como ya se comentó, el recubrimiento de zinalco puede ser logrado por distintos procesos y que el método a utilizar en este trabajo es el de inmersión en caliente, en el cual un material (metal base), se sumerge en el baño fundido de un segundo metal

(metal de recubrimiento). Tras la extracción de la pieza, el metal fundido recubre al primero. Los recubrimientos obtenidos por inmersión del metal en el metal protector en estado líquido alcanzan espesores relativamente grandes, que van desde 50 hasta 500 micras, con excelente adherencia. La capa de recubrimiento que se genera está compuesta por dos zonas, la zona externa del recubrimiento constituida fundamentalmente por el metal de recubrimiento y la zona intermetálica que se origina por difusión del metal fundido dentro del metal a proteger y está formada por un compuesto de composición no estequiométrica metal protector-metal protegido.

El recubrimiento que se logre permitirá que el acero y el zinalco tengan mayor aceptación en varios campos de aplicación; destacándose el área industrial, comercial y hasta la doméstica, con lo cual se logrará un beneficio importante en la utilización del zinc, un recurso natural que existe en México y del cual se cuenta con grandes excedentes, ya que de las 270,000 toneladas que se producen anualmente solo se utilizan 70,000 y el resto se venden a la mitad del precio con respecto del aluminio.

Ahora bien, para que se logrará la realización del Zinalquizado, se tuvo que basar en el proceso de aluminizado, por que el proceso de zinalquizado es semejante a éste. En otras palabras, dadas las características del Zinalco, la obtención del recubrimiento de acero con esta aleación, es basada en la metodología para la obtención de un aluminizado. Razón por la cual es necesario describir en qué consiste.

III.4.1. Aluminizado.

El aluminizado en caliente es un procedimiento de protección contra la corrosión mediante el cual se obtienen recubrimientos de aluminio sobre aleaciones base hierro (como el acero SAE 1018 por ejemplo), por inmersión en un baño de aluminio fundido, a una temperatura comprendida entre 700 y 900 °C durante un tiempo no superior a algunos minutos.

La tecnología de la aluminación por inmersión en caliente presenta un amplio espectro de aplicaciones industriales, gracias a la buena resistencia a la corrosión de los recubrimientos de aluminio obtenidos por difusión y la posibilidad de combinar simultáneamente el recubrimiento de los productos con su tratamiento térmico durante el proceso de aluminizado.

Preparación superficial.

Una buena preparación de la superficie es fundamental a la hora de obtener un buen recubrimiento, la existencia de materiales extraños diseminados sobre la superficie ocasiona defectos en el recubrimiento, no solo en la adherencia, resistencia a la corrosión o continuidad del recubrimiento, sino también en los aspectos de acabado superficial y estético.

Dado que el aluminio fundido no puede atacar al metal base a través de grasas, óxidos y cascarillas, la superficie de las piezas a recubrir ha de estar químicamente limpia antes de su inmersión en el baño de aluminio.

El proceso general para la adecuación de la superficie, consta de tres etapas fundamentales: el desengrasado, el decapado y el fluxado.

Desengrasado.

Mediante el desengrasado se eliminan las impurezas de tipo orgánico como aceites y grasas solubles y los lubricantes que se usan en los procesos de laminación y embutición profunda y también algunas clases de pintura. El desengrasado se puede efectuar mediante:

- ☞ *Soluciones alcalinas en caliente.* Se usan generalmente entre 80 y 90 °C durante unos 20 minutos, siendo la más empelada la disolución de sosa cáustica al 50%.
- ☞ *Soluciones alcalinas en frío.* Se utilizan cuando las piezas están ligeramente engrasadas. Son disoluciones preparadas a base de fosfatos
- ☞ *Desengrase al vapor.* Utiliza vapor de tricloro-etileno, muy eficaz para aceites y grasas, aunque es necesaria una instalación muy costosa.
- ☞ *Desengrase por inmersión en el baño de aluminio.* Es un sistema eficaz sobre todo cuando las piezas tienen pinturas o grandes cantidades de grasa.
- ☞ *Chorro de granalla.* Se suele utilizar cuando las piezas de acero llevan pinturas, cascarillas de recocido, escorias de soldadura, arena, etc., y también para preparar piezas de fundición gris y de fundición maleable.

Decapado

Las impurezas de tipo inorgánico tales como la cascarilla de fabricación y el óxido de recocido, se eliminan mediante el decapado. Normalmente, para este fin se utilizan ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido fluorhídrico y también mezclas de ácidos.

El decapado tiene por objeto eliminar las cascarillas y el óxido, pero no atacar el acero subyacente, puesto que el decapado excesivo origina una superficie áspera y es causa de un recubrimiento poco satisfactorio. Por este motivo se usan inhibidores, los cuales impiden prácticamente el ataque del acero sin afectar la velocidad de eliminación del óxido.

Con el uso de inhibidores de decapado, la superficie del acero queda más lisa y produce un acabado mejor del aluminizado.

- ☞ *Decapado con ácido clorhídrico.* El ácido clorhídrico se utiliza diluido al 50% en volumen y a temperatura ambiente. Es importante que la temperatura del ácido no sea inferior a 150 C, puesto que la reactividad es menor y el ataque del ácido al metal es más lento.
- ☞ *Decapado con ácido sulfúrico.* Se utiliza con un contenido de ácido entre 10 y 14%, Y a una temperatura de 60 a 800 C. El ácido sulfúrico es más económico que el clorhídrico, pero tiene el inconveniente de que se ha de calentar para lograr mayor rapidez de decapado y es mucho más peligroso para el operario.
- ☞ *Decapado con ácido fluorhídrico.* Puede utilizarse en sustitución del chorro de granalla en la limpieza de piezas de fundición, siendo la concentración empleada del 19%. Este ácido es muy peligroso al causar quemaduras si entra en contacto con la piel.
- ☞ *Decapado con mezcla de ácidos.* Se puede utilizar para decapar piezas de fundición. La mezcla suele ser de ácido clorhídrico, ácido fluorhídrico y agua en proporciones de 6:4:40.

Fluxado.

La preparación superficial se completa con el fluxado. Consiste en la inmersión de las piezas en un baño de sales. En general, el fluxante se emplea como agente de activación de la superficie del metal base pero en realidad es un reductor químicamente activo que neutraliza la oxidación del metal base cuando la pieza se introduce en el baño de metal fundido. Existen tres formas diferentes de llevar a cabo le operación de fluxado:

1. *Disolución acuosa.* Los métodos basados en el uso de disoluciones acuosas de fluxado son las más simples y económicas. Una disolución acuosa se puede preparar, controlar y mantener fácilmente, se desprende rápidamente de las piezas y no forma productos indeseables. Para la preparación de los fluxados acuosos se utilizan cloruros y ftuoruros alcalinos en distintas proporciones y también sales de titanio y circonio tales como el fluorocirconato de potasio y el fluorotitanato de potasio anhidro.

2. *Sales fundidas.* Las sales fundidas se pueden utilizar de dos formas, como un baño de flujo independiente del baño de aluminio. Se utiliza el mismo tipo de sales fundidas que en la disolución acuosa a una temperatura entre 700-800°C. La ventaja de las sales fundidas es que se calientan la pieza a la misma temperatura que el baño de aluminio, por lo cual el aluminizado se realiza más rápidamente, al acelerarse la velocidad de reacción entre el aluminio y el hierro. El inconveniente de los baños de sales fundidas es su poca duración dada su gran volatilidad e inestabilidad.

3. *Atmósferas reductoras o inertes.* Las atmósferas reductoras o inertes se utilizan sobre todo en los procesos en continuo ya que implica una simplificación del procedimiento y un aumento de la eficacia. Las atmósferas más empleadas son las de hidrógeno, argón y mezclas de hidrógeno y nitrógeno.

Técnica de inmersión.

Después de sacar las piezas del baño de fluxado, se introducen en el baño de aluminio líquido. Durante el período de inmersión las piezas se suben y se bajan algunas veces, para eliminar el aire que haya podido quedar atrapado y para asegurarse de que el aluminio líquido entre en contacto con la totalidad de la superficie de la pieza.

Debido a la gran reactividad del hierro y el aluminio a temperaturas superiores a los 700°C, el crisol del baño no puede ser de acero o fundición, y se han de emplear crisoles de refractario o de grafito. Un problema más es la disolución del hierro del material que se ha de recubrir dentro del baño de aluminio. Este hierro se combina con el aluminio y forman las características matas o aluminio duro que corresponde en su mayor parte al intermetálico $FeAl_3$. Las matas tienden a adherirse a la superficie de las piezas en forma de granos o nódulos con lo cual estropean el recubrimiento de aluminio, por lo cual se han de retirar periódicamente, dichas matas, del baño de aluminio.

Procesos de post-aluminizado.

En la preparación para la deformación se dice que a pesar de que el aluminio utilizado en el recubrimiento es dúctil, la capa intermetálica formada durante el aluminizado por inmersión en caliente es dura y quebradiza. Por lo cual, cuando se les ha de dar a las piezas un conformado posterior al aluminizado, es necesario reducir los tiempos de inmersión, así como la temperatura del baño, y se deben utilizar elementos de aleación en el baño de aluminio. Esto reducirá el espesor y la dureza de la capa intermetálica, produciendo un recubrimiento más flexible. Aplicados correctamente, los recubrimientos de aluminio, resistirán una moderada deformación, maquinado y estirado, sin escamados o peladuras. El material recubierto se puede doblar hasta 180° sobre un diámetro igual a dos veces su espesor, sin perder la adherencia.

En aplicaciones en las que intervenga la exposición ambiental, el aluminizado obtiene resultados satisfactorios sin ninguna protección adicional. Sin embargo la resistencia a la corrosión, la apariencia y la duración pueden ser mejoradas mediante el empleo de tratamientos de acabado.

Acabados químicos.

Un buen sistema de acabado relativamente económico para los recubrimientos de aluminio por inmersión en caliente, lo constituye la aplicación de cromatos amorfos y películas de fosfatos por técnicas de inmersión o metalización. Ofrecen una mayor resistencia a la corrosión, a la vez que una superficie más decorativa, pero no son particularmente resistentes a trabajos mecánicos. Los recubrimientos cromatados son característicamente de color dorado y dan una mayor resistencia a la corrosión en ambientes marinos, mientras que los fosfatados son típicamente de color verde oscuro.

Recubrimientos anódicos. Coloreado y sellado.

El Anodizado es un proceso electrolítico que sirve para engrosar y estabilizar las películas superficiales de óxido sobre el metal base. La película anódica es un buen soporte para la pintura y el coloreado, o para tratamientos posteriores.

El anodizado se emplea con frecuencia para el aluminio, pues el 5% del aluminio consumido se anodiza, además de otros metales.

Tratamientos mecánicos.

Mediante los tratamientos mecánicos se puede mejorar la apariencia del recubrimiento de las piezas aluminizadas por inmersión en caliente, eliminando las rebabas, los restos de sales de fluxado y los granos de matas que hayan podido quedar adheridas a su superficie.

Generalmente el espesor del recubrimiento no es superior a las 250 μm , por lo cual se habrán de dar tratamientos de acabado poco agresivos como:

- ☞ Chorreados abrasivos con partículas de vidrio las cuales producen una atractiva apariencia mate con la mínima eliminación de material.
- ☞ Maquinados ligeros en donde se ha de tener especial cuidado con las esquinas y los bordes de las piezas, puesto que es donde se arranca mayor cantidad de material.
- ☞ Ruedas de nylon de baja densidad impregnadas con un abrasivo, que proporciona acabados direccionales.
- ☞ Chorreados con arena y granallados con polvo de acero.

III.4.1. Proceso de Zinalquizado.

Para generar el recubrimiento de zinalco sobre el acero SAE 1018, se desarrollo la metodología que a continuación se detalla. Cabe mencionar nuevamente que esta técnica en particular se realiza siguiendo la metodología del aluminizado.

Para lograr el recubrimiento se requiere llevar un control estricto de las variables que interviene en el proceso, desde las materias primas, la temperatura, tiempos, reactivos de limpieza y de activación, así como del metal líquido.

Mientras más limpia esté la interface, mayor será la adherencia entre dos cuerpos, así que debido a la adherencia interfacial cuando ambos cuerpos están en el vacío, la retención es elevada. La energía requerida para agrietar capas de mica en un vacío es aproximadamente 30 veces mayor que la necesaria en el aire. Las superficies se contaminan fácilmente por la presencia del ambiente circundante y, sin duda, esto es benéfico en relación con la vida de un componente desde el punto de vista de falla por retención de material o desgaste. Puesto que un requisito para la adherencia de superficies es el contacto de un metal con otro, el contaminante disminuye las uniones, reduciendo la propensión al desgaste por adherencia.

Materiales y sustancias a emplear.

Para el desarrollo de pruebas experimentales se emplean probetas, en este caso de acero tipo SAE 1018 con calidad comercial producida por AHMSA, cuya composición química es: *C* -0.18 %, *Si* -0.25 % y *Mn* -0.75 %, misma que fue provista por el fabricante, lo cual certifica que cumple con las normas vigentes.

Se utiliza acero de este tipo porque ya se han hecho experimentos de Zinalquizado exitosamente con éste, además que es un tipo de acero, de los bajos en carbono, muy comercial.

Bueno, es claro que el material base es acero y que el recubrimiento es Zinalco.

En la preparación superficial del acero para su posterior recubrimiento, se utilizan los siguientes reactivos:

- Percloroetileno
- Ácido clorhídrico al 10 %
- Tiourea
- Cloruro de zinc
- Cloruro de amonio
- Agua destilada
- Pistola de agua caliente

Generación del recubrimiento.

La preparación que requiere el acero para ser zinalquizado es de suma importancia ya que de ello depende que el zinalco se adhiera al acero.

La primera etapa consiste en cortar el perfil de acero a las dimensiones adecuadas para el tipo de ensayos a realizar.

Posteriormente se procedió a realizar el proceso de limpieza, el cual inicia con la limpieza mecánica por medio de un esmeril, con el fin de eliminar impurezas y dejar una superficie rugosa para una mayor adherencia entre los materiales.

Concluida la limpieza mecánica se procede a realizar el *desengrasado* que consiste en sumergir las probetas durante 10 minutos en una tina que contiene percloroetileno al 100% para poder quitar la grasa que se adhiere al acero debido a su manejo con las manos.

Después se prosigue con el *decapado*, en el cual se prepara ácido clorhídrico diluido en agua al 10% y después se aplica tiourea al 10% que funciona como inhibidor, para que las piezas al ser extraídas del decapado y expuestas al ambiente no se oxiden rápidamente. En este proceso se dejan las piezas por un lapso de 4 minutos.

A continuación se procede al *fluxado* (activación de la superficie), que consiste en hacer una preparación en un vaso de precipitado de cloruro de zinc al 15% en agua destilada, y en otro vaso una preparación de cloruro de amonio al 15% con agua destilada también. Después se mezclan nuevamente, ahora en una proporción del 10% por mezcla, con agua destilada, y se sumergen las piezas en esta solución por un lapso de 3 minutos, para lograr que la superficie esta lista para poder ser recubierta.

En seguida se procede a sacar las probetas y secarlas con una pistola de aire para evitar que oxiden.

El paso siguiente consiste en colocar el lingote de zinalco en un crisol y meterlo en un horno eléctrico a 600°C para alcanzar el estado líquido y permitir su manejo sin que el proceso de solidificación entorpezca el baño de las probetas.

Se extrae el crisol del horno y se sumergen las piezas 5 minutos para lograr la difusión del zinalco en el acero.

Posteriormente, las probetas se introducen en otro horno eléctrico que esta a 300 °C para evitar un choque térmico en éstas y dejarlas a una temperatura cercana a la de recocido.

Si se desea recocer las probetas, se deberán introducir en un horno eléctrico a una temperatura de 320 °C durante una hora.

El procedimiento anterior es el existente para realizar recubrimientos de Zinalco en acero, y se le ha denominado como “Zinalquizado”.

Destacándose que el Zinalquizado presenta al desengrasado, fluxado y decapado como en el aluminizado, pero con las variantes en el tipo de reactivos alcalinos a utilizar, concentraciones y tiempos.

METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE DESGASTE.

En el siguiente capítulo se describe paso a paso la metodología que se siguió para la realización de las pruebas de desgaste en probetas de acero zinalquizados.

Se considero utilizar un acero 1018 como material base por sus características; posteriormente se cortaron barras de acero de un cuadrado con espesor de $\frac{3}{4}$ de pulgada y longitud de 10 cm. Para colaborar a disminuir la suciedad sobre la superficie del acero (polvo, grasas, etc.) se esmerilaron todas las caras de las barras de acero, a este proceso se le conoce como limpieza mecánica.

Para ayudar a generar una buena adherencia entre el material base y el recubrimiento, se aplicó a las probetas de acero el proceso conocido como limpieza química que consiste en sumergir las barras de acero en un reactivo previamente preparado, para eliminar partículas contaminantes.

El primer Proceso es un reactivo que está compuesto por agua destilada al 100%, ácido Clorhídrico al 10% y Tiourea al 5%; y es conocido como *Proceso de Decapado*. Inicialmente se calienta el reactivo con las características descritas anteriormente, hasta que se encuentre a 60⁰C, posteriormente se introdujo cada una de las barras por 5 minutos para provocar la eliminación de oxido superficial.

Después del tiempo de inmersión, las probetas son enjuagadas con agua y secadas con una pistola de aire.

El siguiente Proceso es un activador de la superficie para lo cual se usa un reactivo que está compuesto por Cloruro de Zinc al 15%, Cloruro de Amonio al 15% y Agua destilada al 100%, a este procedimiento se le conoce como *Proceso de Fluxado*. Se introducen las probetas secas en el segundo reactivo mencionado anteriormente durante un tiempo de 5 minutos. Esto es con la finalidad de que las sales ayuden a generar el zinalquizado de las probetas.

Después del tiempo de inmersión, las probetas se ponen a secar al medio ambiente.

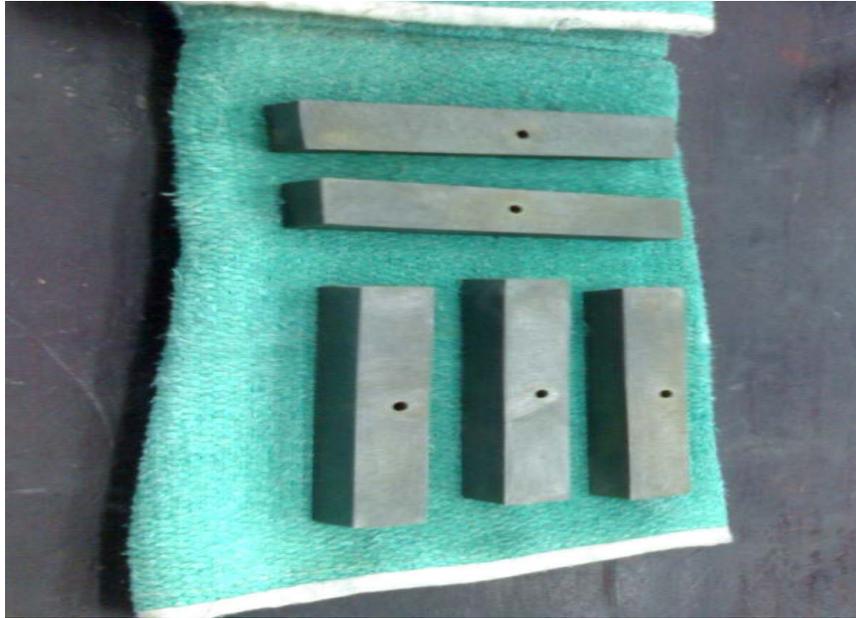


Figura 4.1 Probetas preparadas antes de realizar el Proceso de Recubrimiento de zinalco.

Se pusieron los lingotes de zinalco dentro del crisol y se introdujo en un horno eléctrico (como se mencionó anteriormente; el Zinalco funde a 600°C) para posteriormente meter las probetas de acero en un baño de zinalco fundido. Para este procedimiento se debe tener cuidado de que las probetas se encuentren totalmente secas, ya que una gota de agua en la aleación de zinalco fundido a esta temperatura puede provocar serios problemas o puede hacer que el zinc se oxide y libere gases tóxicos. Las probetas se deben sumergir en el baño de Zinalco por un tiempo de 5 minutos y también son secadas a temperatura ambiente.



Figura 4.2 Se observan las probetas sumergidas en el baño de zinalco dentro del crisol.

Para comparar resultados se tuvieron distintos tipos de probetas, al sacar algunas probetas del baño de zinalco; se retiró con una lámina el recubrimiento en exceso a modo de que el espesor de dicho recubrimiento se redujera, a esto lo nombramos proceso de “rasurado” y así comparar los resultados con probetas “no rasuradas”.



Figura 4.3. Se observan las probetas después del tiempo requerido dentro del zinalco fundido.

Con base a la teoría descrita en capítulos anteriores, se recocieron algunas probetas para comparar las características esperadas por el recocido en el recubrimiento y así tener variedad de probetas para tener información suficiente para concluir resultados.

Se obtuvieron 6 tipos de probetas para así obtener y comparar resultados más exactos en la experimentación del desgaste en materiales recubiertos con zinalco. Los tipos de probetas son los siguientes:

- ❖ Acero Zinalquizado Superficie No Rasurada.
- ❖ Acero Zinalquizado Superficie Rasurada.
- ❖ Acero Zinalquizado Recocido Superficie No Rasurada.
- ❖ Acero Zinalquizado Recocido Superficie Rasurada.
- ❖ Acero Sin Recubrimiento.
- ❖ Acero Recocido Sin Recubrimiento.

Se realizaron ensayos de microdureza Vickers a cada tipo de probeta, por lo cual se tomaron durezas en distintas partes de cada una de las probetas para así saber las características de cada componente en la probeta; las zonas de estudio fueron: material base, interface* y recubrimiento.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos del ensayo:

Tipo de Probeta	Material Base	Interface	Recubrimiento
Acero Recocido Zinalquizado Superficie Rasurada.	193	332	297
Acero Recocido Zinalquizado Superficie No Rasurada.	193	206	206
Acero Zinalquizado Superficie No Rasurada.	206	351	181
Acero Zinalquizado Superficie Rasurada	206	221	170

Tabla 4.1 La carga aplicada durante el ensayo de microdureza fue de 100 g y las unidades de la dureza se encuentran en kg/mm².

Posteriormente se realizaron estudios de microscopia electrónico de barrido (Microscopio marca Philips XL-20) para conocer la microestructura de las probetas recubiertas, Las probetas fueron cortadas en sección transversal y preparadas por técnicas metalográficas usuales; empleando determinadas lijas y finalmente puliendo dicha superficie con paño, Alúmina Gris y Alúmina Blanca hasta dejar la superficie con acabado espejo, para tener una mejor visión de la microestructura del material base, la interface y el recubrimiento. Mediante el microscopio electrónico de barrido, se capturaron las siguientes imágenes, en donde se muestran dichas microestructuras y sus características.

*Nota: La revisión en el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española permite en el presente trabajo el uso de las dos formas (interface-interfase).

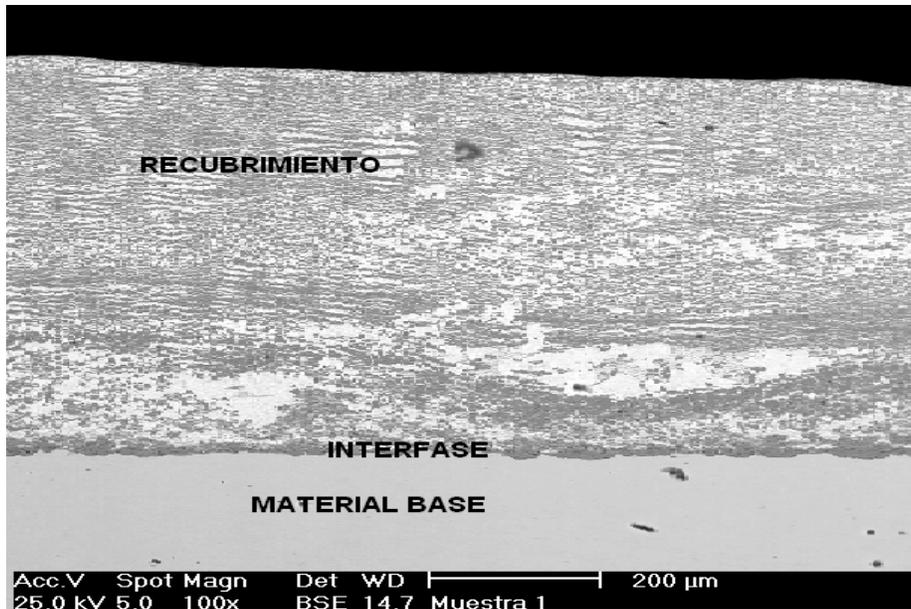


Imagen 4.1 Microscopía Electrónica de Barrido de una probeta de Acero Zinalquizado Recocido Superficie Rasurada a 100x.



Imagen 4.2. Se presenta la imagen anterior con aumento de 200x.

Se observa en la imagen 4.1 una zona externa (recubrimiento) con evidencia de la presencia de la aleación zinalco y una zona aledaña al acero (interface) con alta concentración de zinc (zona blanca).

Se concluye al observar la imagen 4.2 que el aluminio (color gris) tendió a agruparse en la interface, siendo un material menos denso; el zinc (color blanco) tiende a agruparse y a alinearse, en zonas blancas. También podemos detallar que al rasurar las probetas, el recubrimiento presenta una orientación preferente en forma paralela a la superficie del material base.

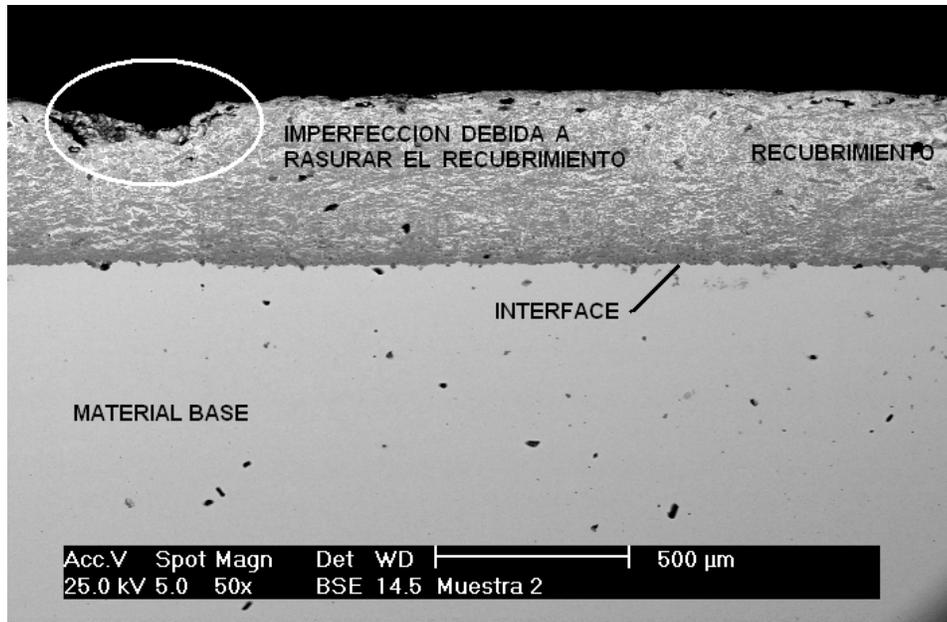


Imagen 4.3 Se observa que la superficie del recubrimiento no es completamente plana, ya que al ser rasurado el recubrimiento tiende a haber imperfecciones en la superficie final, 50x aumentos.

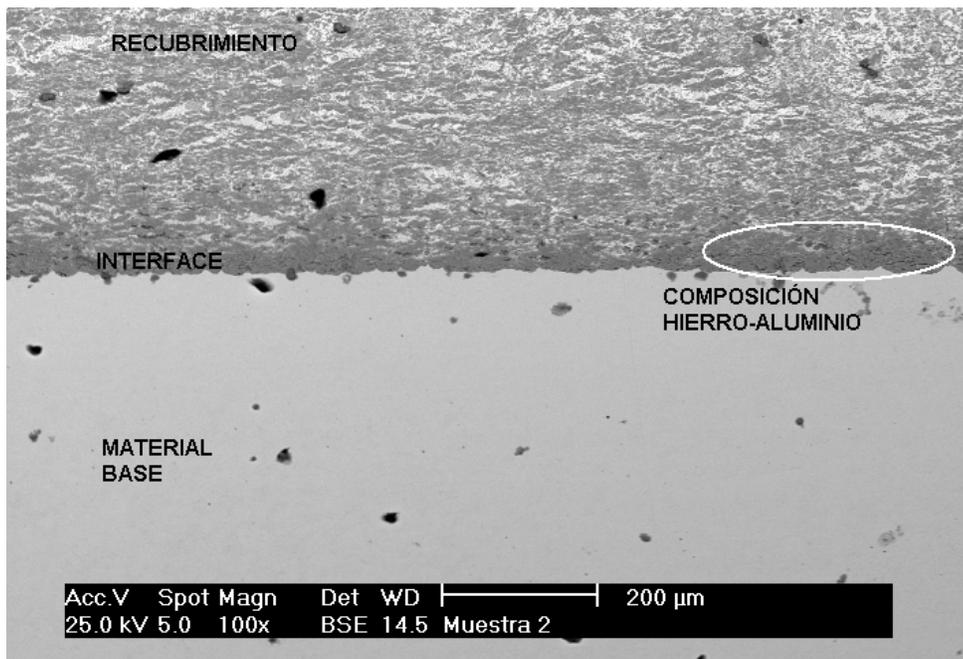


Imagen 4.4 Con 100x aumentos se aprecia que en la interface se forma otra composición rica en Aluminio (Al-Fe), se trata de una probeta de Acero Zinalquizado Superficie Rasurada.

A continuación se presentan imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido de probetas de Acero Recocido Zinalquizado Superficie No Rasurada.

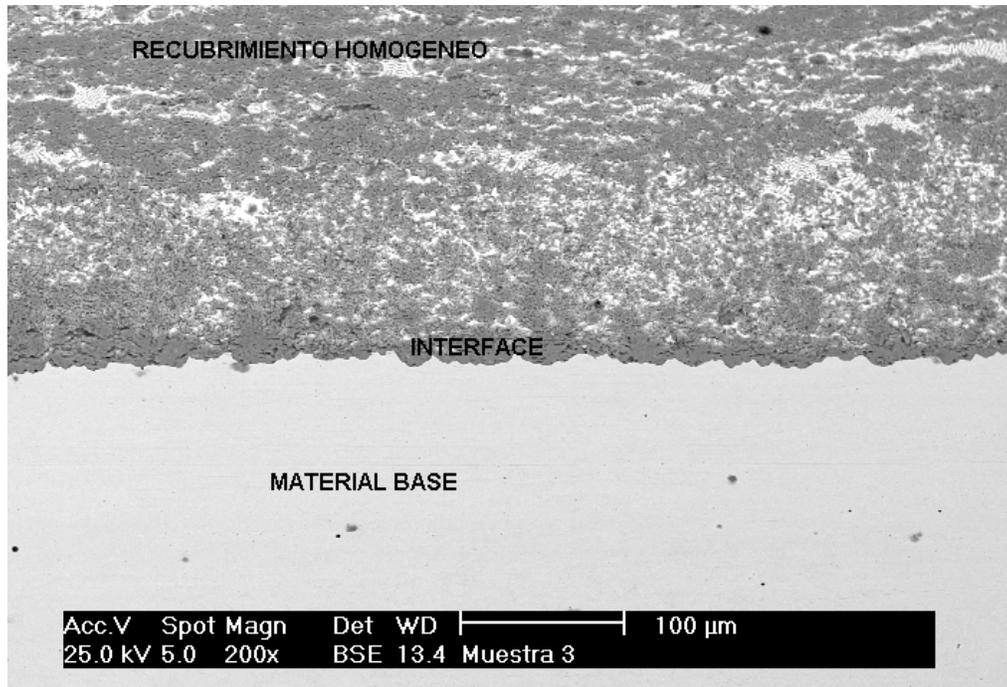


Imagen 4.5. Se observa la Microscopía en la probeta de Acero Recocido Zinalquizado Superficie No Rasurada que el recubrimiento es homogéneo, aumento de 200x.

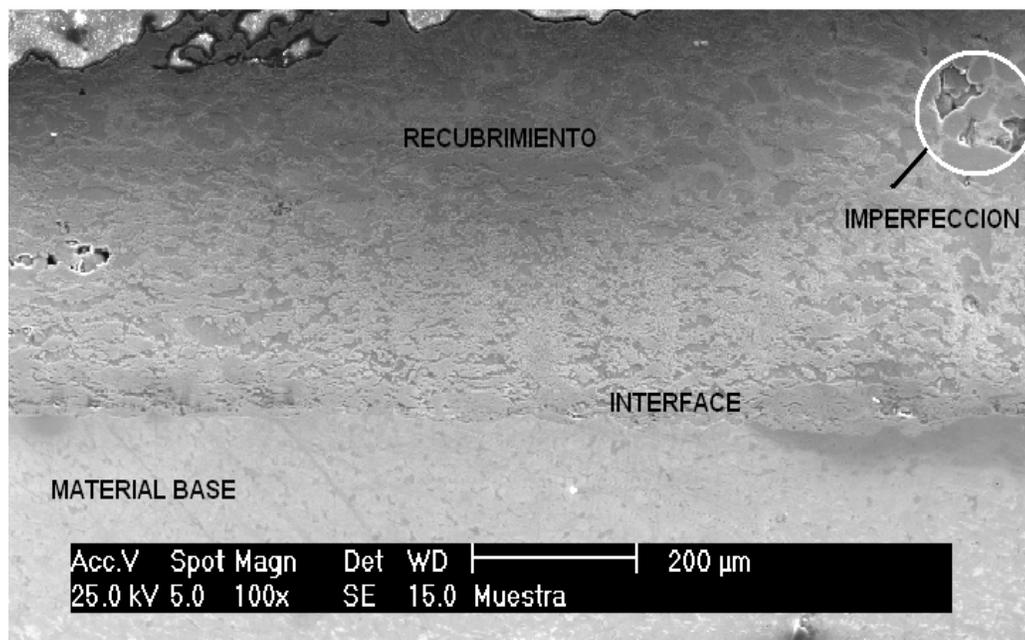


Imagen 4.6 En la Probeta de Acero Zinalquizado Superficie No Rasurada se aprecia que la proporción de componentes en el recubrimiento es homogénea, aumento de 100X

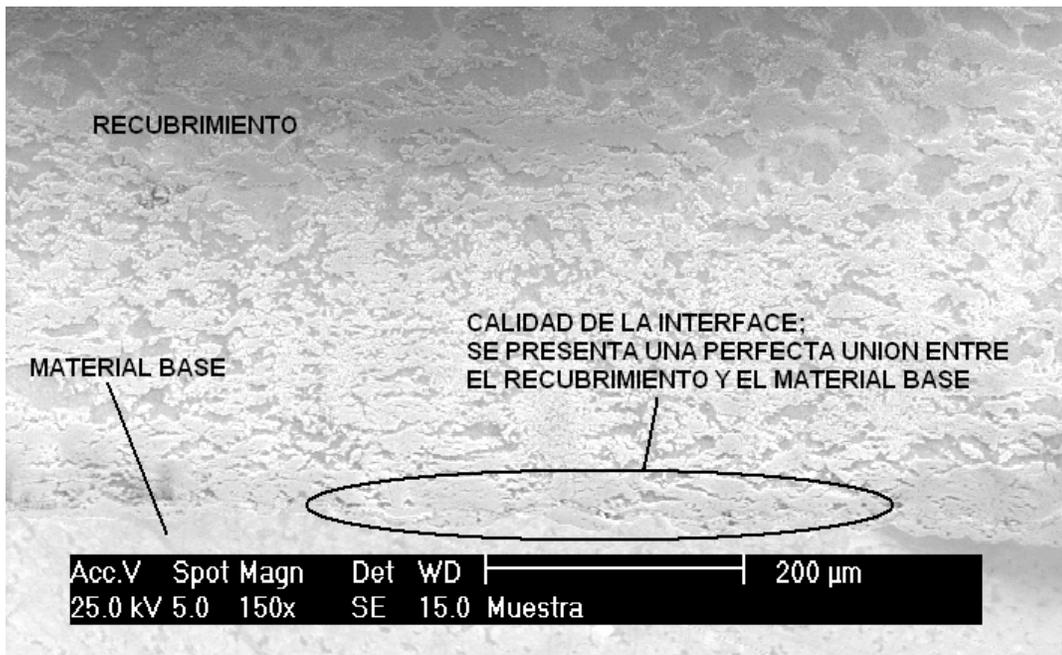


Imagen 4.7 Se aprecia la imagen 4.6 con un aumento de 150 x, es posible identificar que la unión entre el material base y el recubrimiento fue de buena calidad.

Teniendo las probetas zinalquizadas se procedió a cortar probetas mas pequeñas (dimensiones: 2 cm en cada cara) para así llevarlas a una fresadora y maquinara la forma final solicitada para la maquina de pruebas de desgaste.

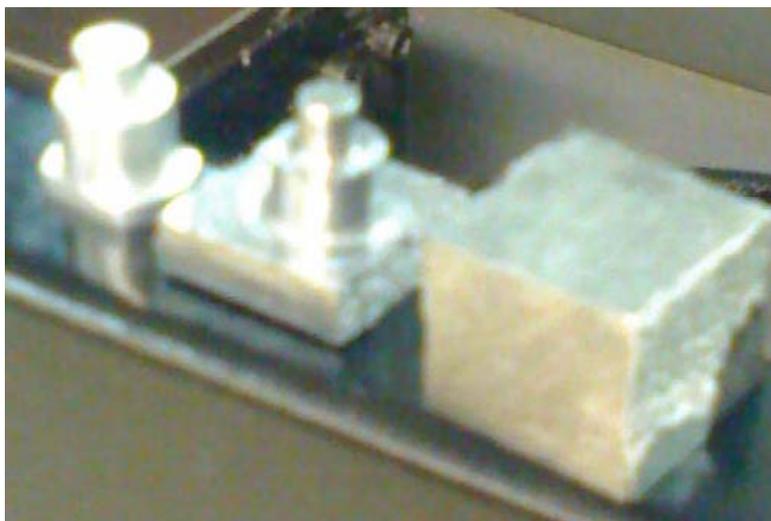


Figura 4.4 Se observa las probetas para el ensayo de desgaste adhesivo, desde la materia prima hasta la pieza final.

Teniendo el prototipo de la probeta final, se procedió a realizar el programa para la Fresadora CNC EMCO VMC150. Ya que la maquina de desgaste que se utilizó para las pruebas, tiene entrada para probetas de dimensiones particulares.

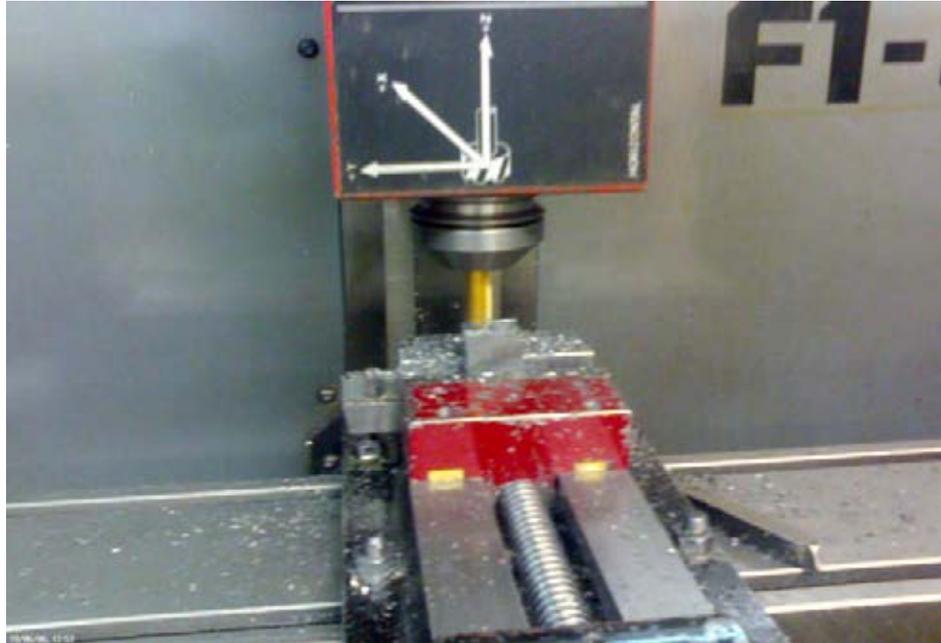


Figura 4.5 Observamos una de las probetas maquinándose en la fresadora CNC.

Finalizadas las distintas probetas son llevadas a la máquina de desgaste que cuenta con gran variedad de maneras de operar; dependiendo de las dimensiones de las probetas, del tipo de recubrimiento, del espesor del recubrimiento, de las propiedades del recubrimiento, entre otras características.

Para este caso se trató de probetas de dimensiones pequeñas (2 cm por lado) y de un recubrimiento cuyo espesor es de micras. Por lo tanto, la carga aplicada en la máquina de desgaste tendría que ser pequeña. La máquina de desgaste cuenta con los siguientes datos de placa:

“Swansea Tribology Centre” CYGNUS.

Friction and wear testing machine.

Motor eléctrico “Tuscan”

Tensión 180 V , Corriente directa 0.1 A

Velocidad 2000 rpm. Modificado a 1200 rpm.

Potencia 1.8 KW = 2.4 hp.



Figura 4.6 Máquina de Desgaste “Swansea Tribology Centre” marca CYGNUS.



Figura 4.7 Brazo de contrapeso de la máquina de Desgaste.



Figura 4.8 Superficie de desgaste.



Figura 4.9 Brazo acoplado con pesas y porta probetas.

El disco utilizado como superficie de rozamiento en las probetas, fue de un **acero clase D2**, cuyas características son:

Acero al alto carbono y alto cromo. Dimensionalmente estable de excelente rendimiento al corte y resistencia al desgaste. Especialmente apto para temple al aire.

COMPOSICIÓN QUÍMICA (% PROMEDIO)					
C	Mn	Si	Cr	Mo	V
1.55	0.35	0.35	11.50	0.80	0.80
Módulo de Elasticidad		30 psi x 10 ⁶ (207 GPa)			
Densidad		7695 kg/m ³ (0.278 lb/in ³)			
Conductibilidad Térmica					
		BTU/hr-ft-°F	W/m°K	cal/cm-s-°C	
a 95°C	(200°F)	12.1	20.9	0.0500	
a 205°C	(400°F)	13.0	22.5	0.0538	
a 315°C	(600°F)	14.0	24.2	0.0579	
a 425°C	(800°F)	14.6	25.3	0.0604	
a 540°C	(1000°F)	14.8	25.6	0.0612	
Coefficiente de Dilatación Térmica					
°C	°F	mm/mm/°C	in/in/°F		
20-95	70-200	10.4x10 ⁻⁶	5.8x10 ⁻⁶		
20-205	70-400	11.3x10 ⁻⁶	6.3x10 ⁻⁶		
20-315	70-600	11.8x10 ⁻⁶	6.6x10 ⁻⁶		
20-425	70-800	12.2x10 ⁻⁶	6.8x10 ⁻⁶		
20-540	70-1000	12.6x10 ⁻⁶	7.0x10 ⁻⁶		
Temperatura de Autenitización			1010 °C	1850°F	
Dureza (Templado y Revenido)			50 HRC	180 Brinell	
Resistencia al impacto			21 ft-lb	28 J	
Medios de Enfriamiento			Aceite o Martempering		

La realización de las pruebas de desgaste consiste básicamente en colocar en la máquina cada tipo de probeta, a ésta; en un intervalo de tiempo aplicarle una carga axial a determinada velocidad de giro del disco. Para cada tiempo Δt se extrae la probeta de la máquina y se procede a la toma del peso en turno.

Las variantes son la velocidad (v) y la carga axial (L). Siendo el parámetro a obtener el Δm (decremento de peso en la probeta).

Con base en el metodología de los estándares para experimentos de desgaste mediante el principio “pin on disk” se le dio seguimiento a la norma *ASTM G99– 95a*.

La cual hace referencia al análisis de Δm a través de la experimentación entre Δv y ΔL . Se tendrán entonces cuatro tipos de pruebas experimentales:

Prueba tipo A, características de velocidad (v) constante y carga axial (L) constante.

Prueba tipo B, características de velocidad (v) constante y carga axial (L) variable.

Prueba tipo C, características de velocidad (v) variable y carga axial (L) constante.

Prueba tipo D, características de velocidad (v) variable y carga axial (L) variable.

Los valores experimentales propuestos son:

- ☞ Velocidad constante $v = 500$ [rpm]
- ☞ Velocidad variable $\Delta v = 100$ [rpm]
- ☞ Carga axial constante $L = 100$ [g]
- ☞ Carga axial variable $\Delta L = 100$ [g]
- ☞ Intervalos de tiempo $\Delta t = 60$ [s]

Los valores experimentales a obtener son:

- ☞ Masa en turno $m = \Delta m$ [g]

A continuación se muestran los registros de la cantidad de masa perdida para cada tipo de probeta durante la realización de los ensayos de desgaste.

PRUEBAS Y LEVANTAMIENTO DE DATOS EN LA EXPERIMENTACIÓN DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE.

1. ACERO ZINALQUIZADO SUPERFICIE NO RASURADA.

A) Prueba: v = cte , L= cte

Datos
 $m_i = 9.4405$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	t [min]
9.4406	0
9.439	1
9.4383	2
9.4381	3
9.438	4
9.4378	5

B) Prueba: v = cte , L= var

Datos
 $m_i = 9.6750$ [g]
 $\Delta L = 100$ [g]
 $v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	L [g]	t [min]
9.675	0	0
9.6749	100	1
9.6747	200	2
9.6746	300	3
9.6745	400	4
9.6744	500	5

C) Prueba: v = var , L= cte

Datos
 $m_i = 9.3433$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	t [min]
9.3433	0	0
9.3431	100	1
9.3427	200	2
9.3422	300	3
9.3418	400	4
9.3416	500	5

D) Prueba: $v = \text{var}$, $L = \text{var}$

Datos
 $m_i = 9.3432[\text{g}]$
 $\Delta L = 100 [\text{g}]$
 $\Delta v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	v [rpm]	L [g]	t [min]
9.3432	0	0	0
9.343	100	100	1
9.3426	200	200	2
9.342	300	300	3
9.3413	400	400	4
9.3411	500	500	5

2. ACERO ZINALQUIZADO SUPERFICIE RASURADA

A) Prueba: $v = \text{cte}$, $L = \text{cte}$

Datos
 $m_i = 9.2760[\text{g}]$
 $L = 100 [\text{g}]$
 $v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	t [min]
9.276	0
9.2756	1
9.2754	2
9.2752	3
9.2749	4
9.2746	5

B) Prueba: $v = \text{cte}$, $L = \text{var}$

Datos
 $m_i = 9.3653[\text{g}]$
 $L = 100 [\text{g}]$
 $v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	L [g]	t [min]
9.3653	0	0
9.365	100	1
9.3648	200	2
9.3645	300	3
9.3643	400	4
9.364	500	5

C) Prueba: v = var , L= cte

Datos
 $m_i = 9.1354$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	t [min]
9.1354	0	0
9.1351	100	1
9.1349	200	2
9.1345	300	3
9.1339	400	4
9.1331	500	5

D) Prueba: v = var , L= var

Datos
 $m_i = 9.1357$ [g]
 $\Delta L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	L [g]	t [min]
9.1357	0	0	0
9.1355	100	100	1
9.1352	200	200	2
9.1348	300	300	3
9.1341	400	400	4
9.1332	500	500	5

3. ACERO RECOCIDO ZINALQUIZADO SUPERFICIE NO RASURADA.

A) Prueba: v = cte , L= cte

Datos
 $m_i = 9.1661$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	t [min]
9.1661	0
9.1658	1
9.1656	2
9.1651	3
9.1645	4
9.1639	5

B) Prueba: v = cte , L= var

Datos
 $m_i = 9.1660$ [g]
 $\Delta L = 100$ [g]
 $v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	L [g]	t [min]
9.166	0	0
9.1657	100	1
9.1655	200	2
9.1649	300	3
9.1641	400	4
9.1632	500	5

C) Prueba: v = var , L= cte

Datos
 $m_i = 9.1658$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	t [min]
9.1658	0	0
9.1655	100	1
9.1649	200	2
9.1641	300	3
9.1633	400	4
9.1628	500	5

D) Prueba: v = var , L= var

Datos
 $m_i = 9.1660$ [g]
 $\Delta L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	L [g]	t [min]
9.166	0	0	0
9.1654	100	100	1
9.1643	200	200	2
9.1636	300	300	3
9.1629	400	400	4
9.1624	500	500	5

4. ACERO RECICADO ZINALQUIZADO SUPERFICIE RASURADA.

A) Prueba: v = cte , L= cte

Datos
 $m_i = 9.1332$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	t [min]
9.1332	0
9.1328	1
9.1325	2
9.1321	3
9.1316	4
9.1312	5

B) Prueba: v = cte , L= var

Datos
 $m_i = 9.1340$ [g]
 $\Delta L = 100$ [g]
 $v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	L [g]	t [min]
9.134	0	0
9.1336	100	1
9.1331	200	2
9.1327	300	3
9.1322	400	4
9.1319	500	5

C) Prueba: v = var , L= cte

Datos
 $m_i = 9.1301$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	t [min]
9.1301	0	0
9.1297	100	1
9.1286	200	2
9.1278	300	3
9.1273	400	4
9.1272	500	5

D) Prueba: $v = \text{var}$, $L = \text{var}$

Datos
 $m_i = 9.1297[\text{g}]$
 $\Delta L = 100 [\text{g}]$
 $\Delta v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	v [rpm]	L [g]	t [min]
9.1297	0	0	0
9.1293	100	100	1
9.1288	200	200	2
9.1277	300	300	3
9.1269	400	400	4
9.1262	500	500	5

5. ACERO SIN RECUBRIMIENTO.

A) Prueba: $v = \text{cte}$, $L = \text{cte}$

Datos
 $m_i = 8.9421[\text{g}]$
 $L = 100 [\text{g}]$
 $v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	t [min]
8.9421	0
8.9413	1
8.9392	2
8.9373	3
8.9355	4
8.9334	5

B) Prueba: $v = \text{cte}$, $L = \text{var}$

Datos
 $m_i = 8.9436[\text{g}]$
 $\Delta L = 100 [\text{g}]$
 $v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	L [g]	t [min]
8.9436	0	0
8.9415	100	1
8.9374	200	2
8.935	300	3
8.9341	400	4
8.9332	500	5

C) Prueba: $v = \text{var}$, $L = \text{cte}$

Datos
 $m_i = 8.9569[\text{g}]$
 $L = 100 [\text{g}]$
 $\Delta v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	v [rpm]	t [min]
8.9569	0	0
8.956	100	1
8.9539	200	2
8.95	300	3
8.9482	400	4
8.9463	500	5

D) Prueba: $v = \text{var}$, $L = \text{var}$

Datos
 $m_i = 8.9398[\text{g}]$
 $\Delta L = 100 [\text{g}]$
 $\Delta v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	v [rpm]	L [g]	t [min]
8.9398	0	0	0
8.9365	100	100	1
8.9343	200	200	2
8.9328	300	300	3
8.9307	400	400	4
8.9289	500	500	5

6. ACERO RECOCIDO SIN RECUBRIMIENTO.

A) Prueba: $v = \text{cte}$, $L = \text{cte}$

Datos
 $m_i = 8.6439[\text{g}]$
 $L = 100 [\text{g}]$
 $v = 500 [\text{rpm}]$
 $\Delta t = 60 [\text{s}]$

m [g]	t [min]
8.6439	0
8.6428	1
8.6412	2
8.6397	3
8.6384	4
8.6375	5

B) Prueba: v = cte , L= var

Datos
 $m_i = 8.6456$ [g]
 $\Delta L = 100$ [g]
 $v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	L [g]	t [min]
8.6456	0	0
8.6447	100	1
8.643	200	2
8.6411	300	3
8.6397	400	4
8.6389	500	5

C) Prueba: v = var , L= cte

Datos
 $m_i = 8.6439$ [g]
 $L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	t [min]
8.6439	0	0
8.6435	100	1
8.642	200	2
8.6402	300	3
8.6389	400	4
8.637	500	5

D) Prueba: v = var , L= var

Datos
 $m_i = 8.6440$ [g]
 $\Delta L = 100$ [g]
 $\Delta v = 500$ [rpm]
 $\Delta t = 60$ [s]

m [g]	v [rpm]	L [g]	t [min]
8.644	0	0	0
8.6435	100	100	1
8.6421	200	200	2
8.6394	300	300	3
8.6377	400	400	4
8.6365	500	500	5

Todas las pruebas fueron realizadas con la mayor precisión posible, tomando en cuenta: errores de la báscula marca Explorer cuya sensibilidad es de 0.0001g, en donde se midieron las masas, la limpieza de partículas del plato de desgaste, el porcentaje de error del tacómetro utilizado para medir la velocidad del motor, entre otros factores.



Figura 4.10 Fotografía de una probeta, antes (izquierda) y después (derecha) de la experimentación.



Figura 4.11 Recubrimiento desgastado después de 5 minutos, tiempo máximo en que se desgasta el recubrimiento del material base.

OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Recordando al objetivo del presente trabajo, el cual explica que se determinará la resistencia al desgaste en el acero recubierto con Zinalco mediante la realización de pruebas de desgaste adhesivo, ensayos de microdureza y estudios metalográficos, se puede resaltar que la resistencia al desgaste se establecerá mediante el estudio comparativo de los resultados en las pruebas realizadas a muestras zinalquizadas y a las no zinalquizadas.

Se particulariza que en las muestras zinalquizadas se tienen superficies rasuradas y no rasuradas, pues en virtud de su análisis; su comportamiento bien puede ser el idóneo para alguna aplicación.

Así se establecieron los siguientes tipos de probetas a analizar:

1. Acero recubierto con Zinalco superficie no rasurada.
2. Acero recubierto con Zinalco superficie rasurada.
3. Acero recocido recubierto con Zinalco superficie no rasurada.
4. Acero recocido recubierto con Zinalco superficie rasurada.
5. Acero sin recubrimiento de Zinalco.
6. Acero recocido sin recubrimiento de Zinalco.

Para comprender la diferencia existente entre cada uno de los seis tipos de muestras requerimos conocer mediante la experimentación la *masa total perdida* y el *porcentaje total de pérdida de peso*. También es de gran importancia conocer el coeficiente de desgaste y la razón de desgaste.

Finalmente se realizará un Análisis Gráfico de la pérdida de peso en función del tiempo, característica más utilizada en el estudio de la resistencia al desgaste, la obtención del Coeficiente de Desgaste, el cual será indicador de la probabilidad de desprendimiento de asperezas de la superficie del acero zinalquizado sobre disco de acero clase D2; mientras que la Razón de Desgaste confirmará el resultado en las gráficas de pérdida de peso.

PÉRDIDA DE MASA.

La cantidad de pérdida de masa es un valor que indica cuánto resistió la superficie de la probeta al efecto de desgaste adhesivo realizado sobre el disco giratorio.

La masa perdida es la diferencia entre la masa inicial y la final, por ende el valor de la masa perdida depende de dos particularidades que hacen que esta nos indique cuánto resistió el recubrimiento en la prueba de desgaste; dichas particularidades son: comparar la masa perdida entre dos o más muestras y expresar la masa perdida como el porcentaje total de pérdida de peso.

En primera instancia, se determinará la resistencia al desgaste conociendo la cantidad total de masa perdida o el porcentaje total de pérdida de peso.

En capítulos anteriores (Cap. 2, sección 2.4.3), se indicaron las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P = (P_i - P_f) \dots (2.21)$$

$$\%PP = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100\% \dots (2.26)$$

En donde la ecuación 2.21 representa la cantidad de masa total perdida, mientras que la ecuación 2.26, el porcentaje total de pérdida de peso.

Estrictamente, la pérdida de masa no es igual que la pérdida de peso, ya que en esta última es implícita la constante universal gravitacional ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$). Sin embargo, durante la realización de las operaciones para obtener ΔP y $\%PP$; será eliminada matemáticamente por su carácter de constante universal. Razón por la cual es tratada la pérdida de masa como pérdida de peso.

V. 1. GRÁFICAS DE LA CANTIDAD DE PÉRDIDA DE PESO.

Con base en los datos capturados en el capítulo cuatro, se procedió a operar en las ecuaciones 2.21 y 2.26 para así obtener los valores de ΔP y $\%PP$ indicados en las tablas de datos y finalmente concluir resultados de manera gráfica.

V.1.1. Acero Zinalquizado superficie no rasurada.

Prueba A. Velocidad y carga constantes

$v = 100 \text{ rpm}$
 $L = 100 \text{ g}$

Tabla 5.1. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	ΔP [g]	%PP
9.4406	0	0	0
9.4390	1	0.0015	0.0159
9.4383	2	0.0022	0.0233
9.4381	3	0.0024	0.0254
9.4380	4	0.0025	0.0265
9.4378	5	0.0027	0.0286

La ΔP y %PP se obtuvieron conforme a la siguiente metodología de cálculo, la cual, posteriormente se programó en hoja de cálculo para lograr obtener los resultados en el resto de las otras pruebas.

Cálculo de ΔP .

Para t = 1 [min]. $\Delta P = (P_i - P_f)$; $\Delta P = (9.4406 \text{ [g]} - 9.4390 \text{ [g]}) = 0.0015 \text{ [g]}$

Para t = 2 [min]. $\Delta P = (P_i - P_f)$; $\Delta P = (9.4406 \text{ [g]} - 9.4383 \text{ [g]}) = 0.0022 \text{ [g]}$

Para t = 3 [min]. $\Delta P = (P_i - P_f)$; $\Delta P = (9.4406 \text{ [g]} - 9.4381 \text{ [g]}) = 0.0024 \text{ [g]}$

Para t = 4 [min]. $\Delta P = (P_i - P_f)$; $\Delta P = (9.4406 \text{ [g]} - 9.4380 \text{ [g]}) = 0.0025 \text{ [g]}$

Para t = 5 [min]. $\Delta P = (P_i - P_f)$; $\Delta P = (9.4406 \text{ [g]} - 9.4378 \text{ [g]}) = 0.0027 \text{ [g]}$

Cálculo de %PP

Para t = 1 [min].

$$\%PP = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100\% ; \quad \%PP = \frac{9.4406[g] - 9.4390[g]}{9.4406[g]} \times 100\% = 0.0159 \%$$

Para t = 2 [min].

$$\%PP = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100\% ; \quad \%PP = \frac{9.4406[g] - 9.4383[g]}{9.4406[g]} \times 100\% = 0.0233 \%$$

Para t = 3 [min].

$$\%PP = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100\% ; \quad \%PP = \frac{9.4406[g] - 9.4381[g]}{9.4406[g]} \times 100\% = 0.0254 \%$$

Para $t = 4$ [min].

$$\%PP = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100\% ; \quad \%PP = \frac{9.4406[g] - 9.4380[g]}{9.4406[g]} \times 100\% = 0.0265 \%$$

Para $t = 5$ [min].

$$\%PP = \frac{P_i - P_f}{P_i} \times 100\% ; \quad \%PP = \frac{9.4406[g] - 9.4378[g]}{9.4406[g]} \times 100\% = 0.0286 \%$$

Esta metodología únicamente se desarrolló por pasos para este tipo de probeta y en este tipo de prueba; ya que para los demás tipos de experimentos el desarrollo es totalmente semejante.

Resultando para la prueba A, que la masa total perdida y el porcentaje total de pérdida de peso son:

$$m_{TA} = 0.0027 [g]$$

$$\%PP_{TA} = 0.0286 [\%]$$

Para el estudio comparativo, se realizan gráficas del porcentaje de pérdida de peso en función del tiempo (%PP vs. t) y así tener una percepción de cuánto se desgastó el recubrimiento que se sometió a trabajo mecánico.

Se presenta entonces en forma grafica el comportamiento de la superficie desgastada de la probeta en turno, sin comparación con otra u otras curvas; la idea fundamental es observar de manera metódica la conducta de la pérdida de peso a través del tiempo, es decir; que tan suave es la curva, la linealidad en determinado tiempo, el desgaste inicial y los máximos que pueda tener la curva.

Para la muestra de “acero Zinalquizado superficie no rasurada”, prueba A y cuyas características son velocidad y carga constantes resultó la siguiente gráfica:

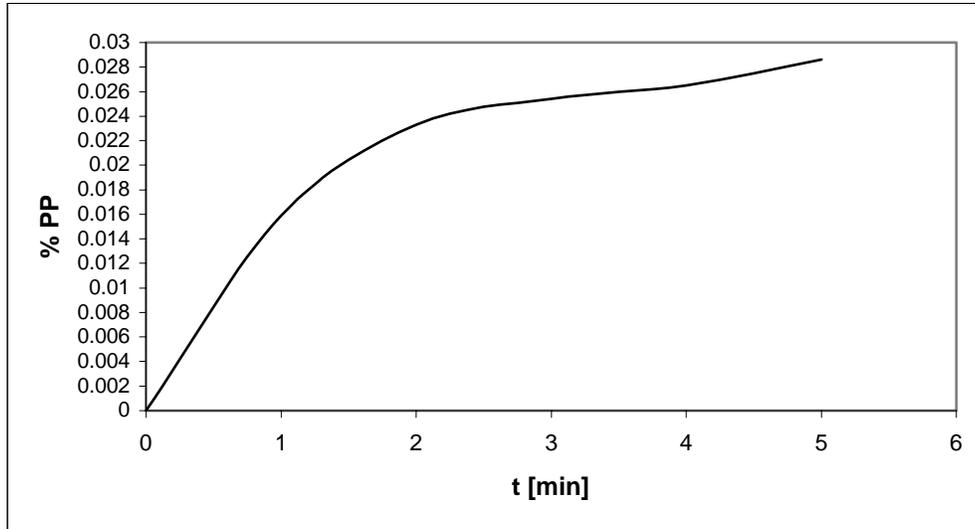


Fig. 5.1. Gráfica de la prueba A en el acero Zinalquizado superficie no rasurada

Prueba B. Velocidad constante y carga variable.

v = 100 rpm

L = var.

Tabla 5.2. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.675	0	0	0	0
9.6749	1	100	0.0001	0.0010
9.6747	2	200	0.0003	0.0031
9.6746	3	300	0.0004	0.0041
9.6745	4	400	0.0005	0.0051
9.6744	5	500	0.0006	0.0062

Como se comentó, ΔP y %PP se obtuvieron mediante la programación de la metodología en hoja de cálculo.

Resultando entonces para la prueba B, los valores de la masa total perdida y el porcentaje total de pérdida siguientes:

$$m_{TB} = 0.0006 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TB} = 0.0062 \text{ [%]}$$

La gráfica resultante es:

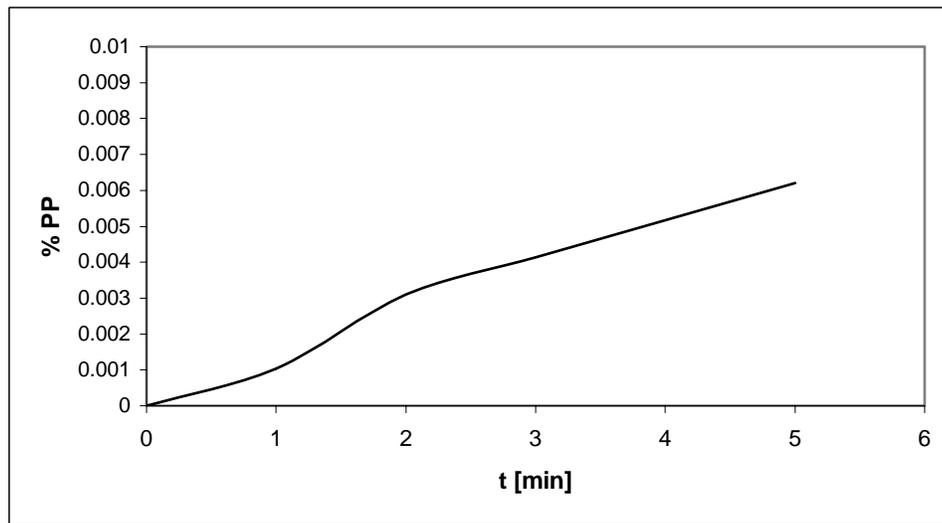


Fig. 5.2. Gráfica de la prueba B en el acero Zinalquizado superficie no rasurada

Prueba C. Velocidad variable y carga constante.

v = var.

L = 100 g

Tabla 5.3. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	ΔP [g]	%PP
9.3433	0	0	0	0
9.3431	1	100	0.0002	0.0021
9.3427	2	200	0.0006	0.0064
9.3422	3	300	0.0011	0.0118
9.3418	4	400	0.0015	0.0160
9.3416	5	500	0.0017	0.0182

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TC} = 0.0017 [g]$$

$$\%PP_{TC} = 0.0182 [\%]$$

La gráfica resultante es:

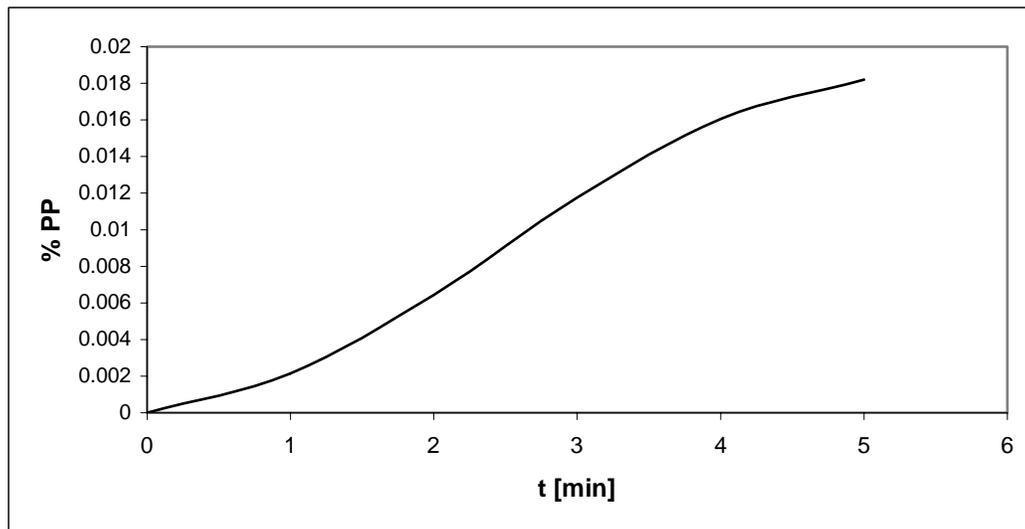


Fig. 5.3. Gráfica de la prueba C en el acero Zinalquizado superficie no rasurada

Prueba D. Velocidad variable y carga variable.

v = var.

L = var.

Tabla 5.4. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.3432	0	0	0	0	0
9.3430	1	100	100	0.0002	0.0021
9.3426	2	200	200	0.0006	0.0064
9.3420	3	300	300	0.0012	0.0128
9.3413	4	400	400	0.0019	0.0203
9.3411	5	500	500	0.0021	0.0225

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TD} = 0.0021 [g]$$

$$\%PP_{TD} = 0.0225 [\%]$$

La gráfica resultante es:

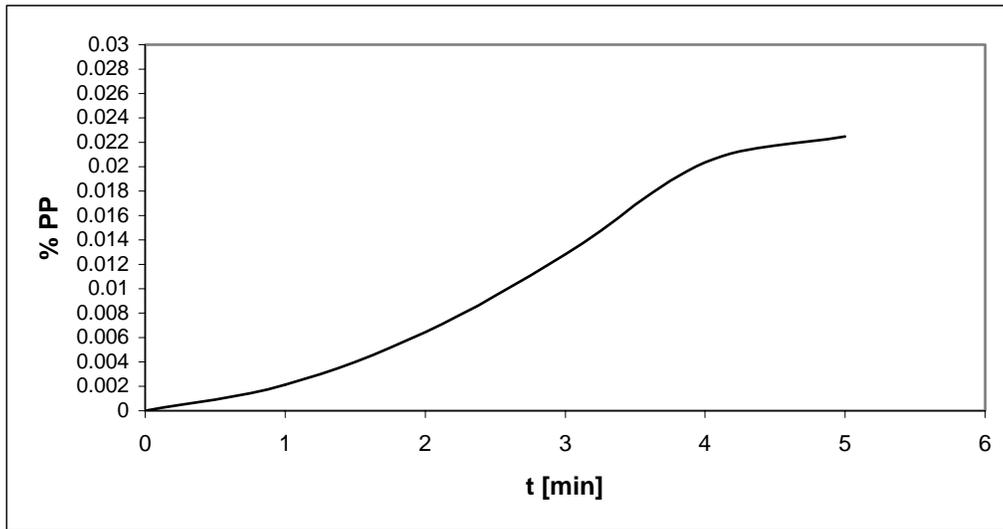


Fig. 5.4. Gráfica de la prueba D en el acero Zinalquizado superficie no rasurada

Se presenta para el acero Zinalquizado con superficie no rasurada, la gráfica comparativa donde se sobreponen las cuatro curvas de las pruebas experimentales a fin de permitir su análisis.

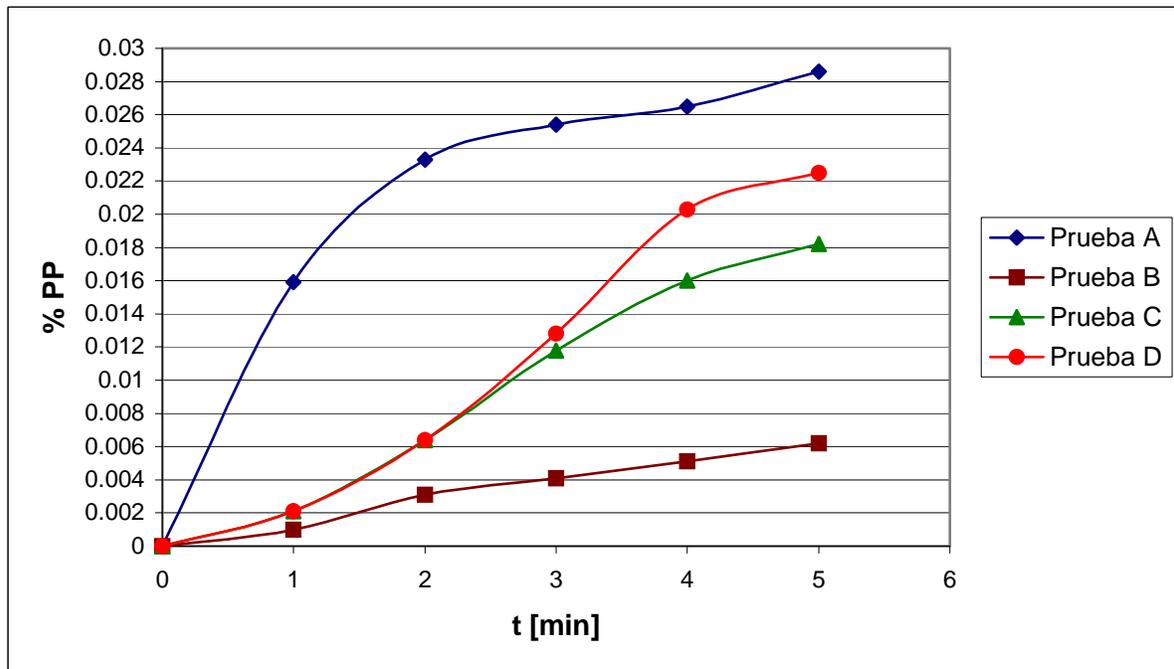


Figura 5.5. Gráfica general de todas las pruebas de la probeta en turno. En A: $v=cte$ y $L=cte$, en B: $v=cte$ y $L=var$, en C: $v=var$ y $L=cte$, en D: $v=var$ y $L=var$.

En el capítulo cuatro se determinó que aproximadamente en el minuto 5, el recubrimiento es eliminado en su totalidad de la probeta, por lo que la mayor pérdida se dará en este minuto.

Como la superficie no está rasurada, es posible concluir que las asperezas se hayan presentado durante el primer par de minutos, debido al levantamiento abrupto en las curvas, (del minuto dos al cuatro) en donde se presenta la mayor linealidad; posteriormente han desaparecido las asperezas, lo cual hace que la adhesión sea más homogénea hasta llegar a la interface del material; esto sucede en el transcurso del minuto cuatro al cinco.

La prueba con mejor resultado es la B ($v = \text{cte.}$, $L = \text{var.}$), en la cual otra vez las asperezas se hacen presentes en los primeros dos minutos de la prueba al mostrarse el levantamiento poco lineal de la curva, del minuto dos hasta el cinco se presenta linealidad en la curva; lo que indica que la fricción se fue incrementando debido a que se proporcionó cada vez más carga para una sola velocidad. Se observa que el porcentaje de pérdida de peso mayor no llegó al 0.01%, luego; el desgaste fue el menor en esta prueba.

La prueba con peor resultado es la A ($v = \text{cte.}$, $L = \text{var.}$), ya que en el minuto dos se perdió más peso que en las otras pruebas, también la mayor linealidad se presenta del minuto dos al cuatro, y llegar a la interface tomó de manera análoga, un minuto. La explicación de la característica de esta curva es que al no variar los parámetros de cuantificación, ocasionó que las asperezas desprendidas abrasaran la superficie de la probeta, lo que aceleró el proceso de adhesión y posteriormente la rápida pérdida de peso.

En el caso de las pruebas C y D, donde la velocidad es variable, las curvas son semejantes, aunque es claro que en la prueba D la pérdida de masa es mayor debido a que ambos parámetros son variables (velocidad y carga). Lo que demuestra que la prueba D es la más severa.

Finalmente, se muestra una fotografía de probetas zinalquizadas con superficie no rasurada. La probeta de la izquierda aún no está desgastada; nótese el espesor del recubrimiento, la probeta de la derecha está desgastada y el recubrimiento prácticamente desapareció. Solamente se puede apreciar la interface, lo que indica para esta probeta que la resistencia se dio solo en el recubrimiento.



Figura 5.6. Fotografía de la probeta en turno, a la izquierda probeta sin desgastar, a la derecha probeta desgastada.

V.1. 2. Acero Zinalquizado superficie rasurada.

Prueba A. Velocidad y carga constantes

$v = 100 \text{ rpm}$

$L = 100 \text{ g}$

Tabla 5.5. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	ΔP [g]	%PP
9.2760	0	0	0
9.2756	1	0.0004	0.0043
9.2754	2	0.0006	0.0065
9.2752	3	0.0008	0.0086
9.2749	4	0.0011	0.0119
9.2746	5	0.0014	0.0151

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TA} = 0.0014 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TA} = 0.0151 \text{ [%]}$$

La gráfica resultante es:

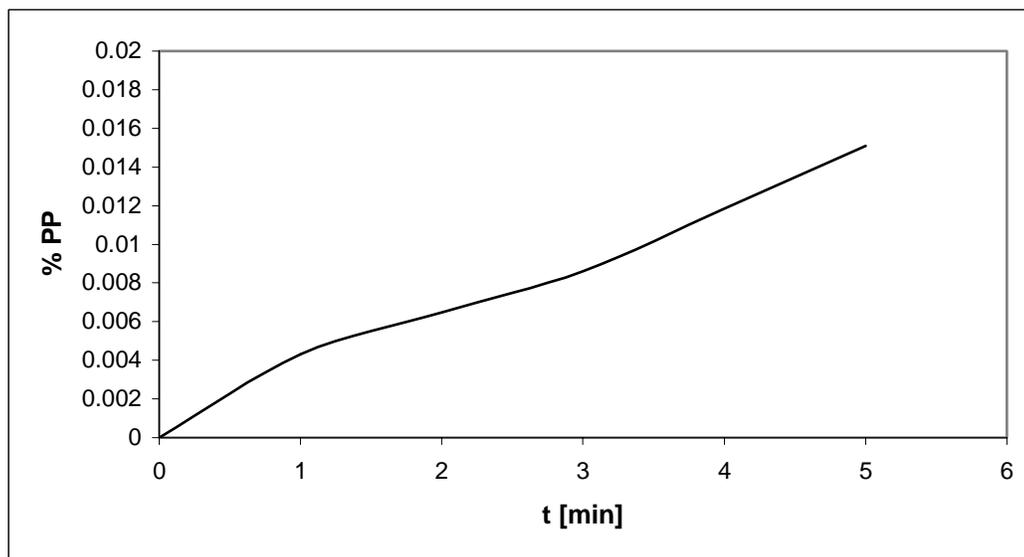


Fig. 5.7. Gráfica de la prueba A en el acero Zinalquizado superficie rasurada

Prueba B. Velocidad constante y carga variable.

v = 100 rpm

L = var.

Tabla 5.6. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.3653	0	0	0	0
9.3650	1	100	0.0003	0.0032
9.3648	2	200	0.0005	0.0053
9.3645	3	300	0.0008	0.0085
9.3643	4	400	0.0010	0.0107
9.3640	5	500	0.0013	0.0139

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TB} = 0.0013 [g]$$

$$\%PP_{TB} = 0.0139 [\%]$$

La gráfica es:

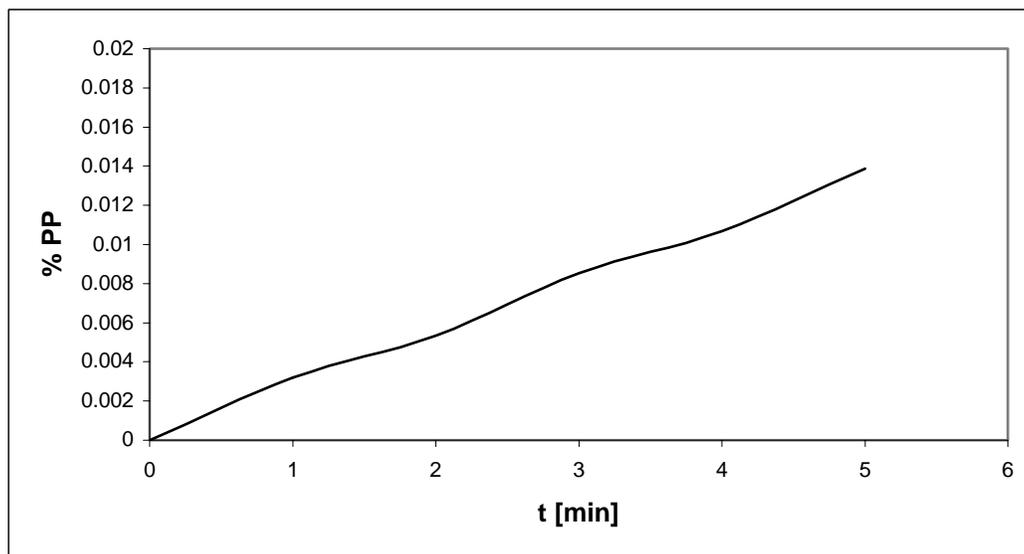


Fig. 5.8. Gráfica de la prueba B en el acero Zinalquizado superficie rasurada

Prueba C. Velocidad variable y carga constante.

v = var.

L = 100 g

Tabla 5.7. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	ΔP [g]	%PP
9.1354	0	0	0	0
9.1351	1	100	0.0003	0.0033
9.1349	2	200	0.0005	0.0055
9.1345	3	300	0.0009	0.0098
9.1339	4	400	0.0015	0.0164
9.1331	5	500	0.0023	0.0252

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TC} = 0.0023 [g]$$

$$\%PP_{TC} = 0.0252 [\%]$$

Resultando la siguiente gráfica:

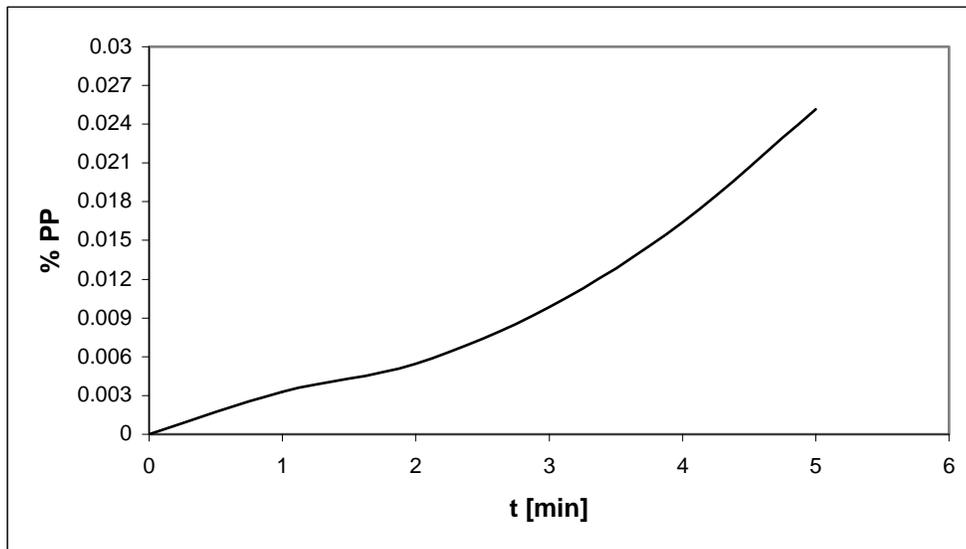


Figura 5.9. Gráfica de la prueba C en el acero Zinalquizado superficie rasurada

Prueba D. Velocidad variable y carga variable.

v = var.

L = var.

Tabla 5.8. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.1357	0	0	0	0	0
9.1355	1	100	100	0.0002	0.0022
9.1352	2	200	200	0.0005	0.0055
9.1348	3	300	300	0.0009	0.0099
9.1341	4	400	400	0.0016	0.0175
9.1332	5	500	500	0.0025	0.0274

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TD} = 0.0025 [g]$$

$$\%PP_{TD} = 0.0274 [\%]$$

La gráfica es:

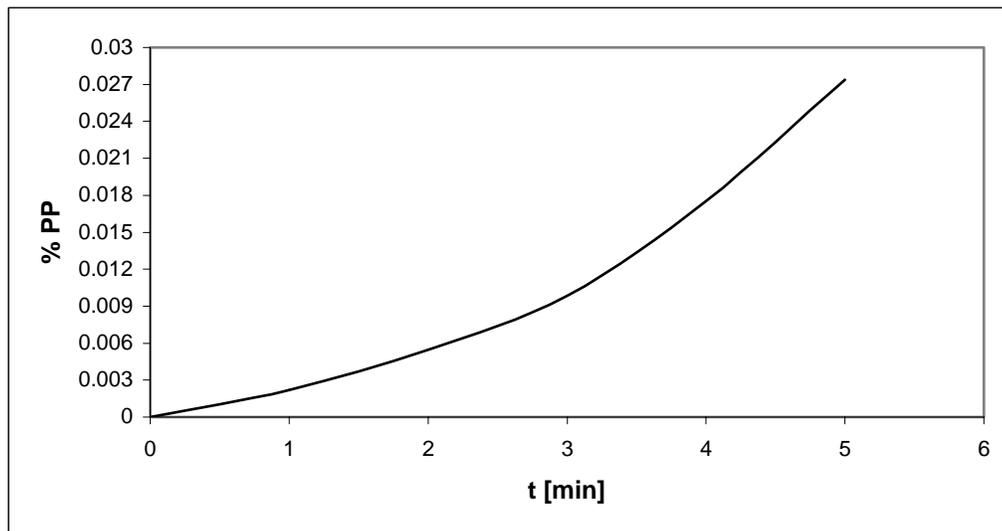


Fig. 5.10. Gráfica de la prueba D en el acero Zinalquizado superficie rasurada

En general, para el acero Zinalquizado con superficie rasurada se tiene el siguiente comportamiento.

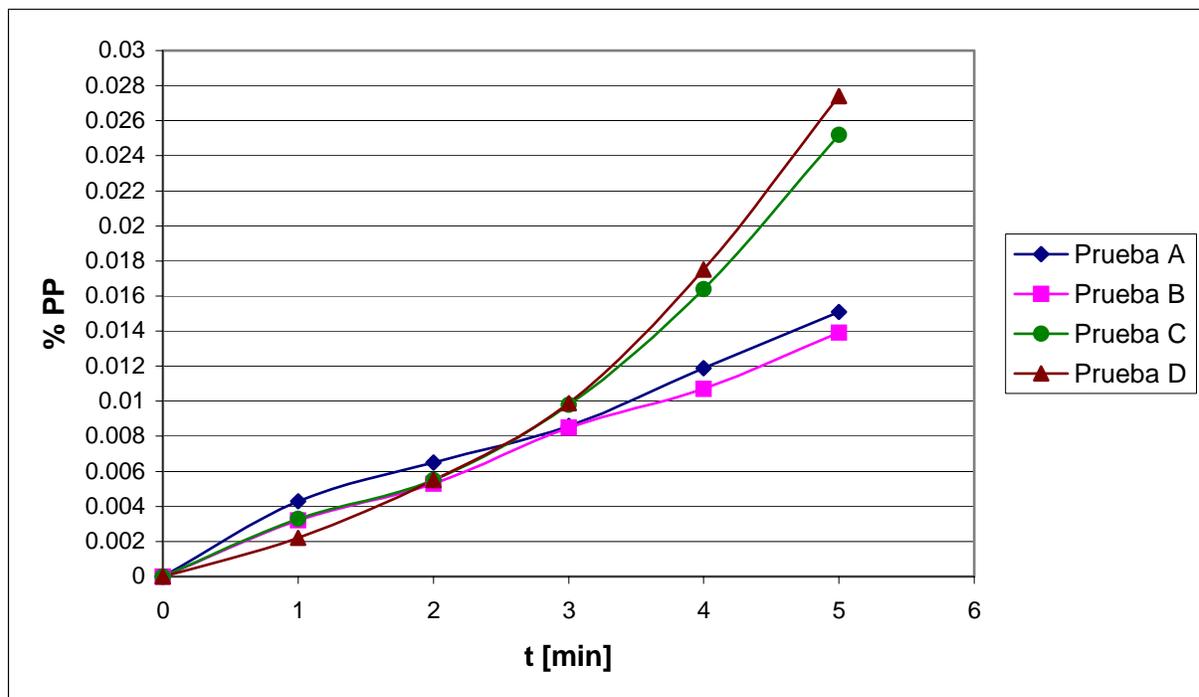


Fig. 5.11. Gráfica general de todas las pruebas de la probeta en turno. En A: $v=cte$ y $L=cte$, en B: $v=cte$ y $L=var$, en C: $v=var$ y $L=cte$, en D: $v=var$ y $L=var$.

Como es de esperarse, la prueba D pierde más peso ya que fue la más severa, debido a que se variaron velocidad y carga. La prueba con menor pérdida de peso es la B por ende las pruebas A y C son las intermedias, aunque se observa que al tratarse de una superficie rasurada, ésta no posee asperezas; lo que ocasionó que en la prueba A se presentara mayor pérdida de peso.



Figura 5.12. Fotografía de la probeta en turno, a la izquierda sin desgastar y a la derecha ya desgastada.

V.1. 3. Acero recocido Zinalquizado superficie no rasurada.

Prueba A. Velocidad y carga constantes

$v = 100 \text{ rpm}$

$L = 100 \text{ g}$

Tabla 5.9. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	ΔP [g]	%PP
9.1661	0	0	0
9.1658	1	0.0003	0.0033
9.1656	2	0.0005	0.0054
9.1651	3	0.001	0.0109
9.1645	4	0.0016	0.0174
9.1639	5	0.0022	0.0240

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TA} = 0.0022 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TA} = 0.0240 \text{ [%]}$$

La gráfica resultante es:

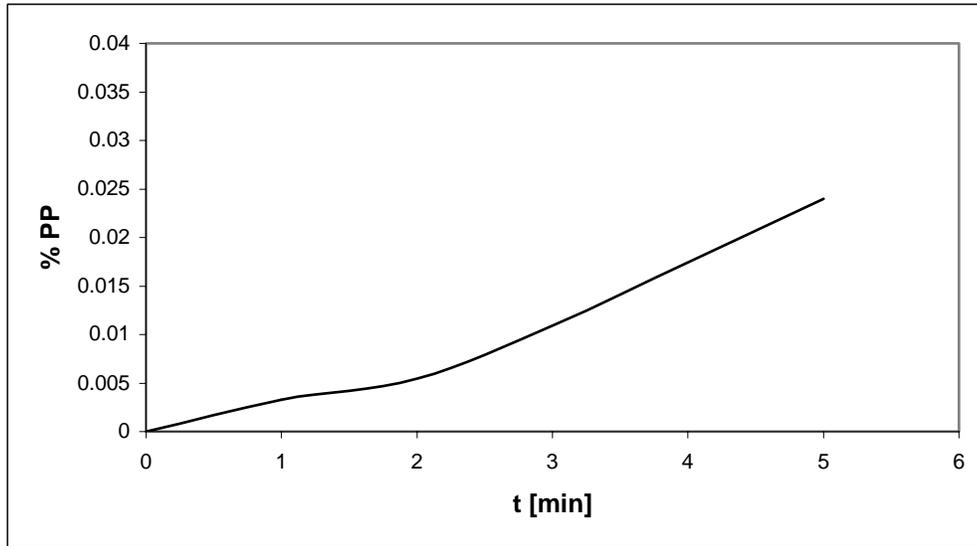


Figura 5.13. Gráfica de la prueba A en el acero recocido Zinalquizado superficie no rasurada

Prueba B. Velocidad constante y carga variable.

v = 100 rpm

L = var.

Tabla 5.10. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.1660	0	0	0	0
9.1657	1	100	0.0003	0.0033
9.1655	2	200	0.0005	0.0055
9.1649	3	300	0.0011	0.0120
9.1641	4	400	0.0019	0.0207
9.1632	5	500	0.0028	0.0305

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TB} = 0.0028 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TB} = 0.0305 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

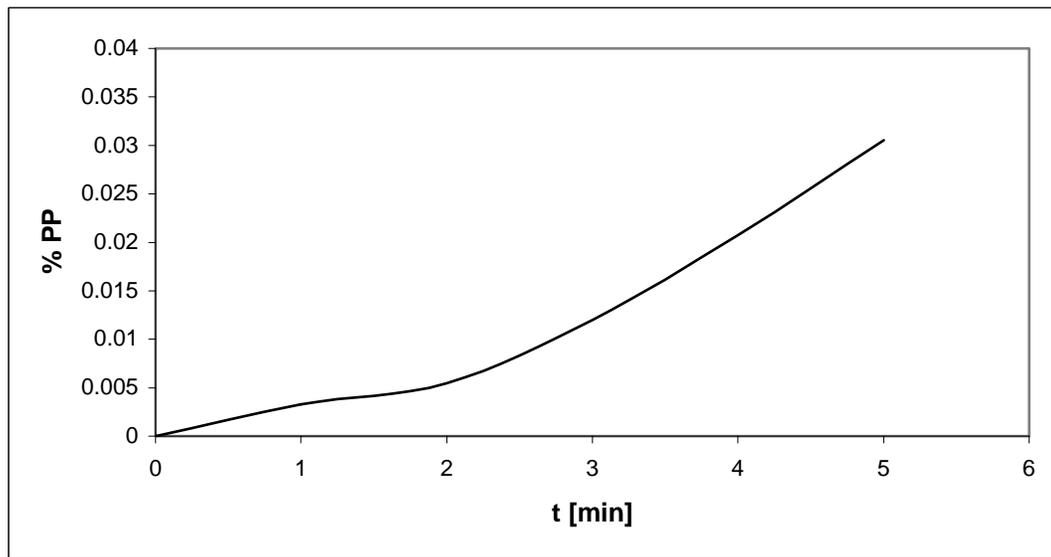


Fig. 5.14. Gráfica de la prueba B en el acero recocido Zinalquizado superficie no rasurada

Prueba C. Velocidad variable y carga constante.

v = var.

L = 100 g

Tabla 5.11. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	ΔP [g]	%PP
9.1658	0	0	0	0
9.1655	1	100	0.0003	0.0033
9.1649	2	200	0.0009	0.0098
9.1641	3	300	0.0017	0.0185
9.1633	4	400	0.0025	0.0273
9.1628	5	500	0.0030	0.0327

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TC} = 0.0030 [g]$$

$$\%PP_{TC} = 0.0327 [\%]$$

La gráfica es:

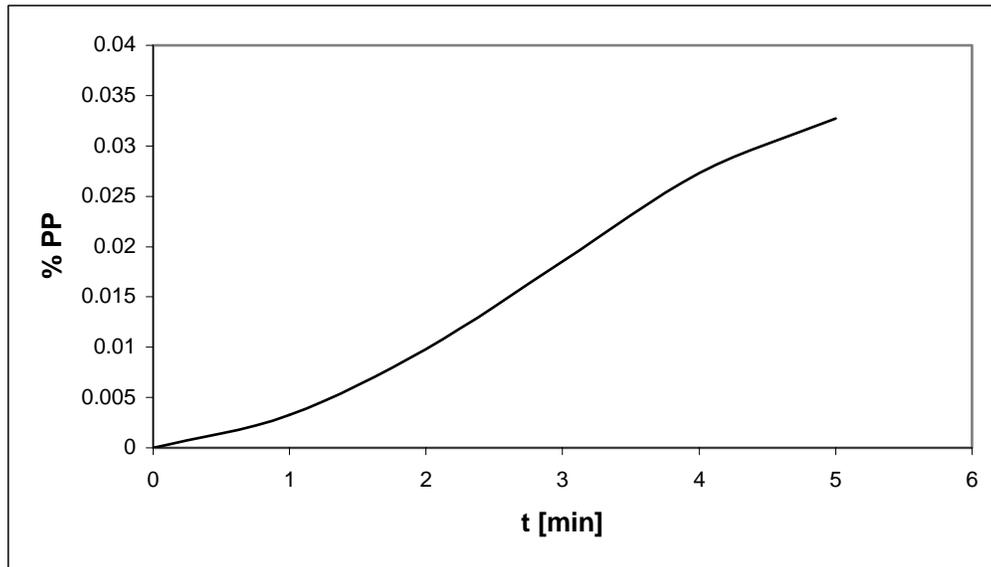


Figura 5.15. Gráfica de la prueba C en el acero recocido Zinalquizado superficie no rasurada

Prueba D. Velocidad variable y carga variable.

v = var.

L = var.

Tabla 5.12. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.1660	0	0	0	0	0
9.1654	1	100	100	0.0006	0.0065
9.1643	2	200	200	0.0017	0.0185
9.1636	3	300	300	0.0024	0.0261
9.1629	4	400	400	0.0031	0.0338
9.1624	5	500	500	0.0036	0.0393

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TD} = 0.0036 [g]$$

$$\%PP_{TD} = 0.0339 [\%]$$

La gráfica es:

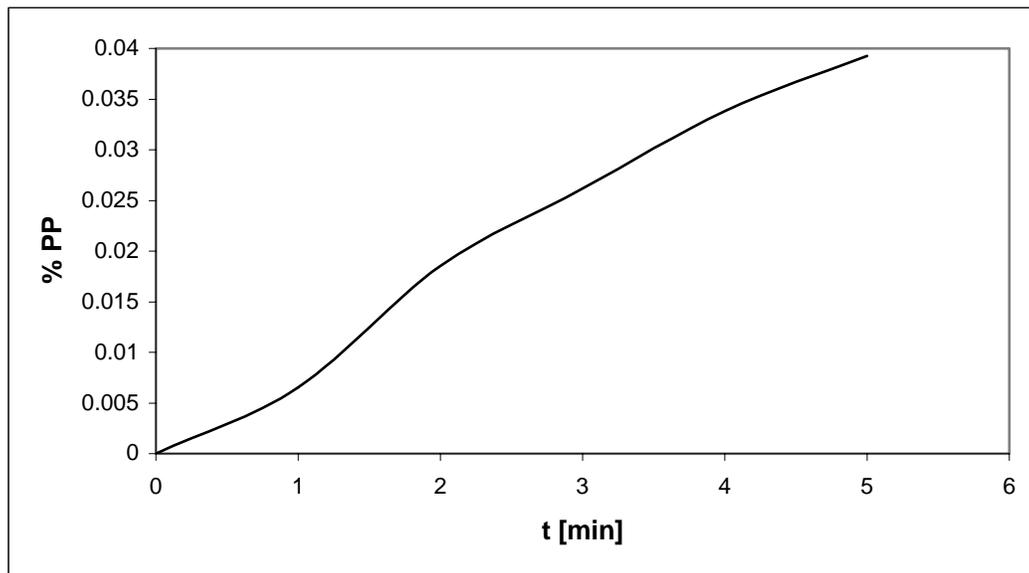


Figura 5.16. Gráfica de la prueba D en el acero recocido Zinalquizado superficie no rasurada

Finalmente para el acero recocido Zinalquizado con superficie no rasurada se tiene el siguiente comportamiento.

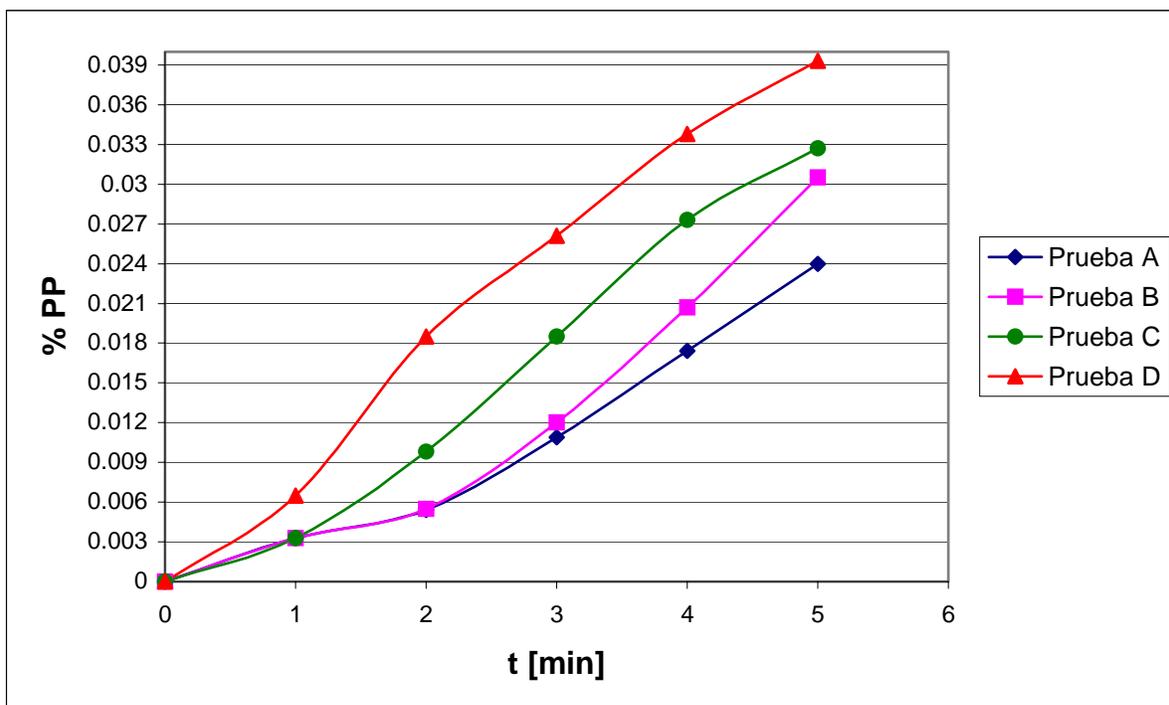


Figura 5.17. Gráfica general de todas las pruebas de la probeta en turno. En A: $v=cte$ y $L=cte$, en B: $v=cte$ y $L=var$, en C: $v=var$ y $L=cte$, en D: $v=var$ y $L=var$.

En comparación con el acero sin recocer en donde la prueba A fue la que perdió más peso, en esta prueba en donde el la probeta fue recocida se observa que al mantener constantes velocidad y carga el aumento de pérdida de masa es menor que en las otras pruebas, al parecer las asperezas de la superficie no rasurada no influyeron. Al ser recocida la probeta el material se vuelve dúctil y por tanto la adhesión tiene menor efecto sobre el recubrimiento ya que la transmisibilidad¹ del disco de desgaste no solo la recibe el recubrimiento sino también el material base.

Visualmente no se puede reconocer si un acero fue recocido o no, en la siguiente fotografía se observa que para este tipo de probeta se desprendió casi la misma cantidad de recubrimiento que en la probeta sin recocer (Fig. 5.6).



Fig. 5.18. Fotografía de la probeta en turno, a la izquierda sin desgastar y a la derecha ya desgastada.

¹ El principio de transmisibilidad dice que una fuerza resultante atravesará un cuerpo debido a una carga aplicada sobre la superficie de éste.

V.1. 4. Acero recocido Zinalquizado superficie rasurada.

Prueba A. Velocidad y carga constantes

v = 100 rpm

L = 100 g

Tabla 5.13. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	ΔP [g]	%PP
9.1332	0	0	0
9.1328	1	0.0004	0.0044
9.1325	2	0.0007	0.0077
9.1321	3	0.0011	0.0120
9.1316	4	0.0016	0.0175
9.1312	5	0.0020	0.0219

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TA} = 0.0020 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TA} = 0.0219 \text{ [%]}$$

La gráfica resultante es:

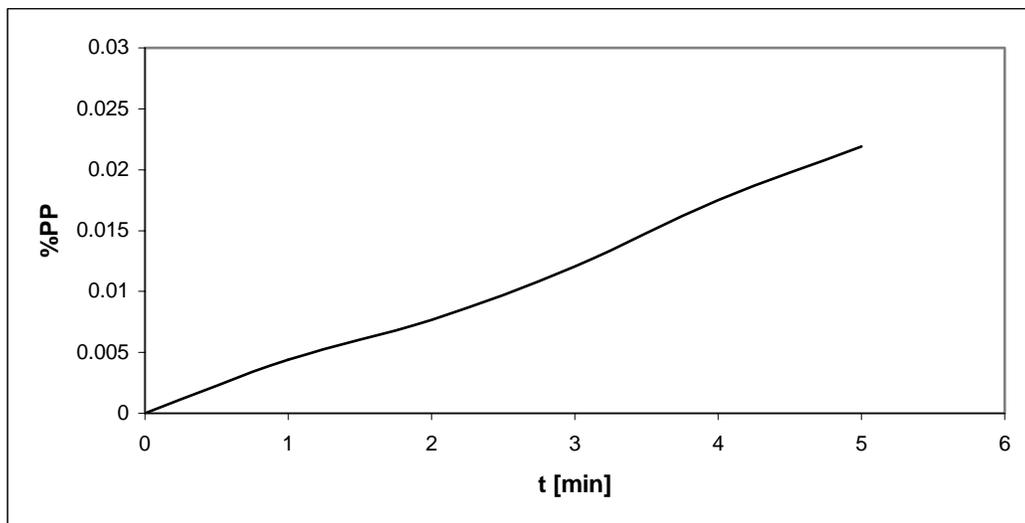


Figura 5.19. Gráfica de la prueba A en el acero recocido Zinalquizado superficie rasurada

Prueba B. Velocidad constante y carga variable.

v = 100 rpm

L = var.

Tabla 5.14. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.1340	0	0	0	0
9.1336	1	100	0.0004	0.0044
9.1331	2	200	0.0009	0.0098
9.1327	3	300	0.0013	0.0142
9.1322	4	400	0.0018	0.0197
9.1319	5	500	0.0021	0.0230

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TB} = 0.0021 [g]$$

$$\%PP_{TB} = 0.0230 [\%]$$

La gráfica es:

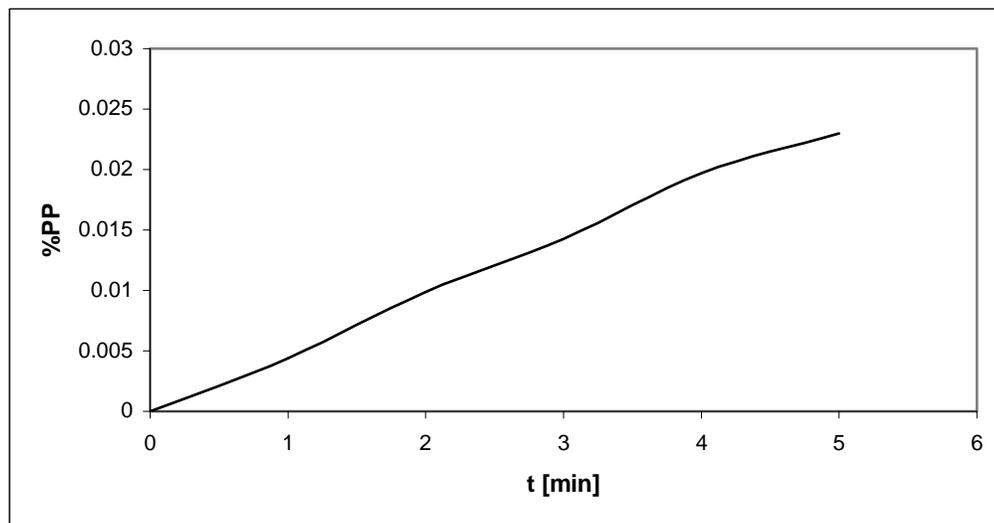


Fig. 5.20. Gráfica de la prueba B en el acero recocido Zinalquizado superficie rasurada

Prueba C. Velocidad variable y carga constante.

v = var.

L = 100 g

Tabla 5.14. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	ΔP [g]	%PP
9.1301	0	0	0	0
9.1297	1	100	0.0004	0.0043
9.1286	2	200	0.0015	0.0164
9.1278	3	300	0.0023	0.0252
9.1273	4	400	0.0028	0.0307
9.1272	5	500	0.0029	0.0318

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TC} = 0.0029 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TC} = 0.0318 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

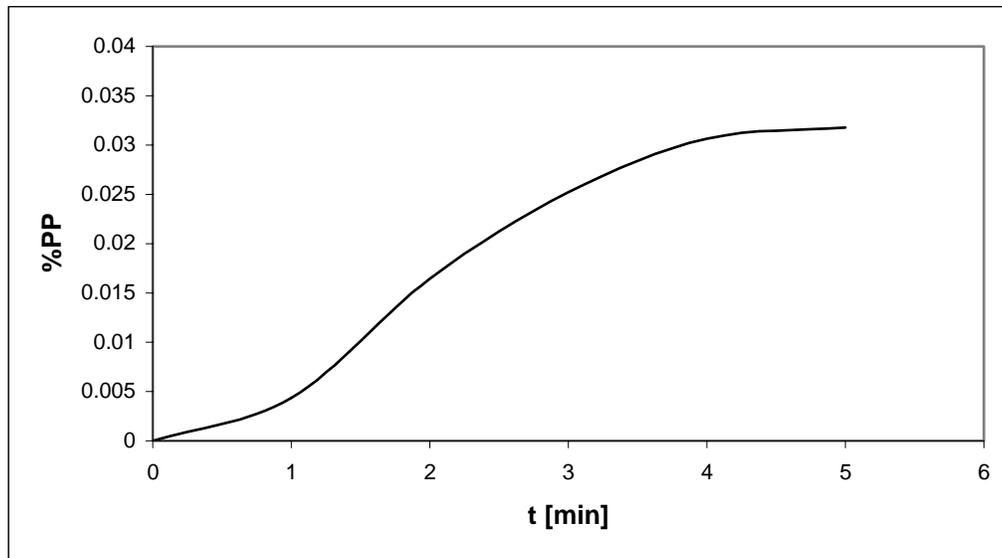


Fig. 5.21. Gráfica de la prueba C en el acero recocido Zinalquizado superficie rasurada

Prueba D. Velocidad variable y carga variable.

v = var.

L = var.

Tabla 5.15. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	L [g]	ΔP [g]	%PP
9.1297	0	0	0	0	0
9.1293	1	100	100	0.0004	0.0044
9.1288	2	200	200	0.0009	0.0098
9.1277	3	300	300	0.002	0.0219
9.1269	4	400	400	0.0028	0.0307
9.1262	5	500	500	0.0035	0.0383

Obteniéndose para este tipo de prueba una masa total perdida y un porcentaje total de pérdida de peso siguientes:

$$m_{TD} = 0.0035 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TD} = 0.0383 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

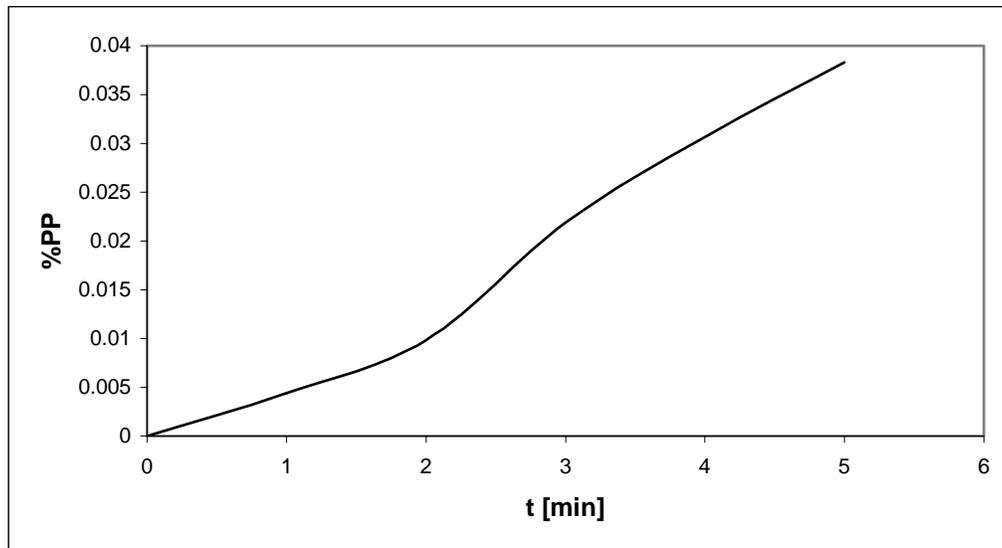


Figura 5.22. Gráfica de la prueba D en el acero recocido Zinalquizado superficie rasurada

En general, para el acero recocido Zinalquizado con superficie rasurada se tiene el siguiente comportamiento.

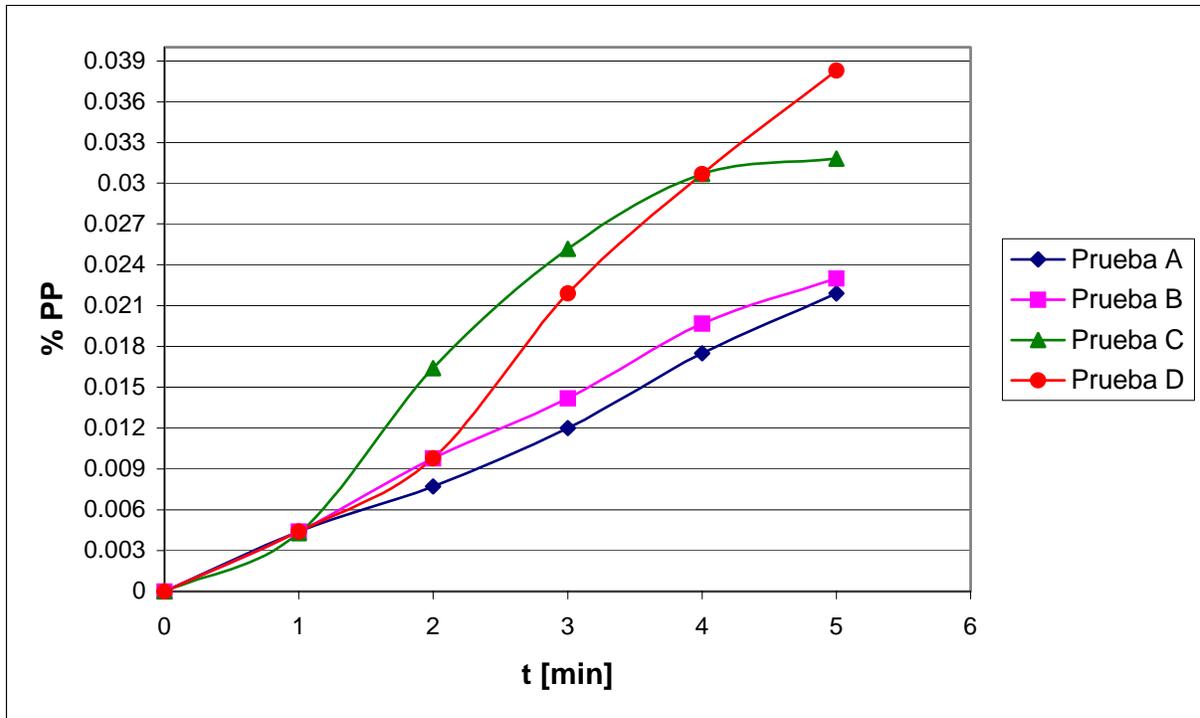


Figura 5.23. Grafica general de todas las pruebas de la probeta en turno. En A: $v=cte$ y $L=cte$, en B: $v=cte$ y $L=var$, en C: $v=var$ y $L=cte$, en D: $v=var$ y $L=var$.

Para este tipo de probeta, la prueba D fue la que presentó mayor pérdida de masa, en cambio la prueba C fue la mejor que resistió el desgaste, la posible razón es que al tratarse de una probeta recocida y recubrimiento sin asperezas (superficie rasurada) y particularidades de carga constante pero velocidad variable; la adhesión de material fue mas rápida.



Figura 5.24. Fotografía de la probeta en turno, a la derecha probeta sin desgastar, a la izquierda probeta desgastada.

V.1. 5. Acero sin recubrimiento.

Los ensayos en aceros sin recubrimiento servirán como referencia de comparación con respecto a los ensayos en aceros zinalquizados. Dependiendo del comportamiento de los aceros sin recubrimiento se podrá determinar que tan resistentes son los aceros zinalquizados.

La figura 5.25 muestra la pérdida de volumen de una probeta de acero sin recocer y sin recubrimiento, en ella se puede observar la diferencia de altura en comparación con probetas con recubrimiento; por lo que es de esperarse valores de porcentaje de pérdida de peso mayores.

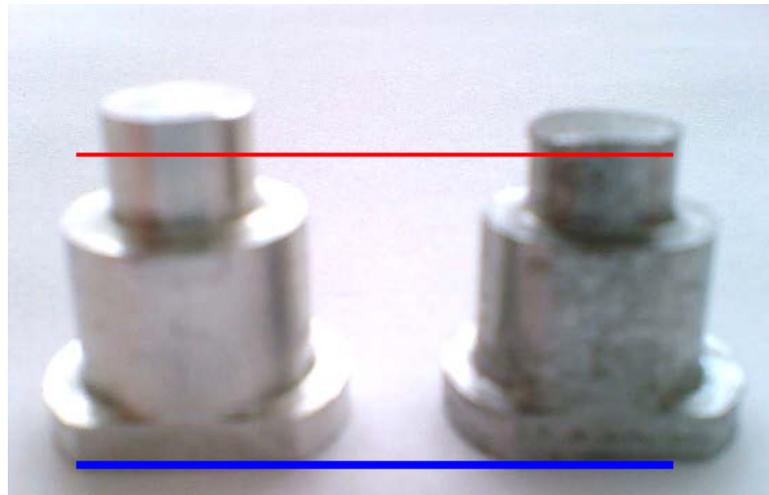


Figura 5.25. Diferencia de alturas entre una probeta de acero sin desgastar (izquierda) y una probeta desgastada (derecha). La línea azul es la base de ambas probetas y la línea roja indica el nivel de la base desgastada.

Prueba A. Velocidad y carga constantes

$v = 100 \text{ rpm}$

$L = 100 \text{ g}$

Tabla 5.16. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	ΔP [g]	%PP
8.9421	0	0	0
8.9413	1	0.0008	0.0089
8.9392	2	0.0029	0.0324
8.9373	3	0.0048	0.0537
8.9355	4	0.0066	0.0738
8.9334	5	0.0087	0.0973

Bajo las mismas condiciones de cálculo que en los aceros zinalquizados, se obtuvieron la masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso, cuyos valores son:

$$m_{TA} = 0.0087 [g]$$

$$\%PP_{TA} = 0.0973 [\%]$$

Al igual que en los ensayos de aceros zinalquizados, se presentan gráficas con las curvas de los resultados obtenidos en cada prueba, para notar las características de cada una. La duración de la prueba será la misma, pero la escala del %PP será mayor que en los aceros zinalquizados.

La grafica en la prueba A para el acero sin recubrimiento y sin recocer es:

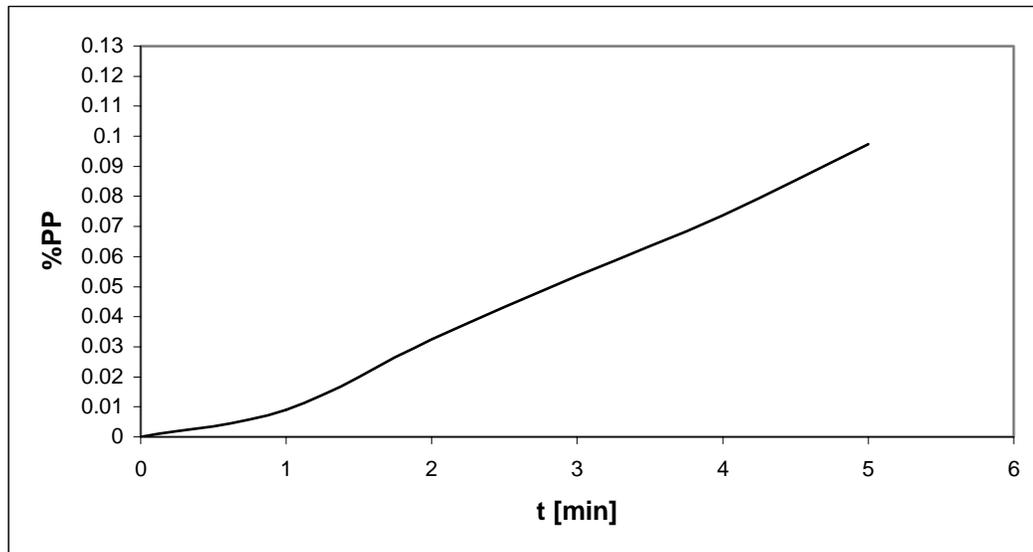


Figura 5.26. Gráfica de la prueba A en el acero sin recubrimiento.

Prueba B. Velocidad constante y carga variable.

v = 100 rpm

L = var.

Tabla 5.17. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	L [g]	ΔP [g]	%PP
8.9436	0	0	0	0
8.9415	1	100	0.0021	0.0235
8.9374	2	200	0.0062	0.0693
8.935	3	300	0.0086	0.0962
8.9341	4	400	0.0095	0.1062

La masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso para esta prueba son:

$$m_{TB} = 0.0095 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TB} = 0.1062 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

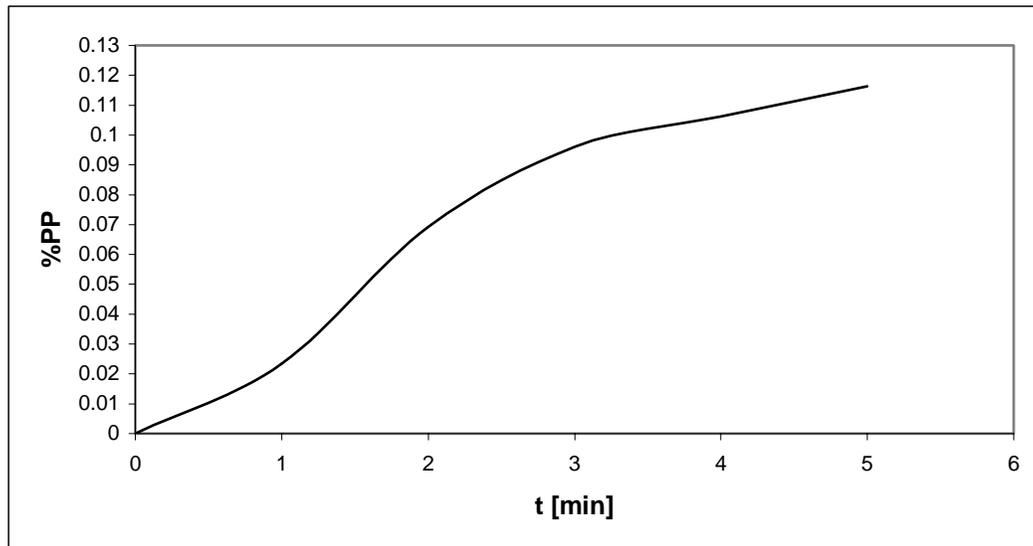


Figura 5.27. Gráfica de la prueba B en el acero sin recubrimiento.

Prueba C. Velocidad variable y carga constante.

v = var.

L = 100 g

Tabla 5.18. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	ΔP [g]	%PP
8.9569	0	0	0	0
8.956	1	100	0.0009	0.0101
8.9539	2	200	0.003	0.0335
8.9500	3	300	0.0069	0.0770
8.9482	4	400	0.0087	0.0971
8.9463	5	500	0.0106	0.1183

La masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso para este caso son:

$$m_{TC} = 0.0106 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TC} = 0.1183 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

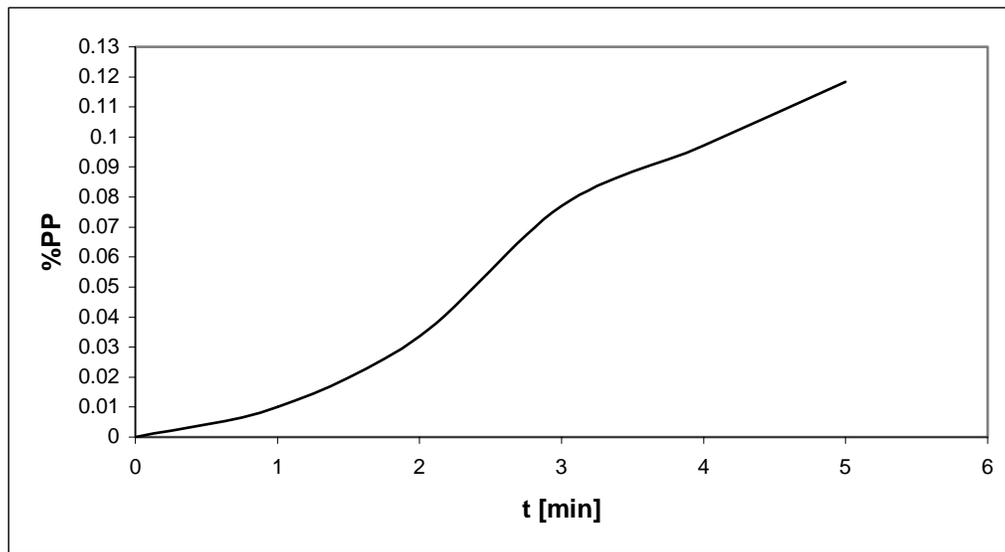


Figura 5.28. Gráfica de la prueba C en el acero sin recubrimiento.

Prueba D. Velocidad variable y carga variable.

v = var.

L = var.

Tabla 5.19. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	L [g]	ΔP [g]	%PP
8.9398	0	0	0	0	0
8.9365	1	100	100	0.0033	0.0369
8.9343	2	200	200	0.0055	0.0615
8.9328	3	300	300	0.0070	0.0783
8.9307	4	400	400	0.0091	0.1018
8.9289	5	500	500	0.0109	0.1219

La masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso para esta prueba son:

$$m_{TD} = 0.0109 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TD} = 0.1219 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

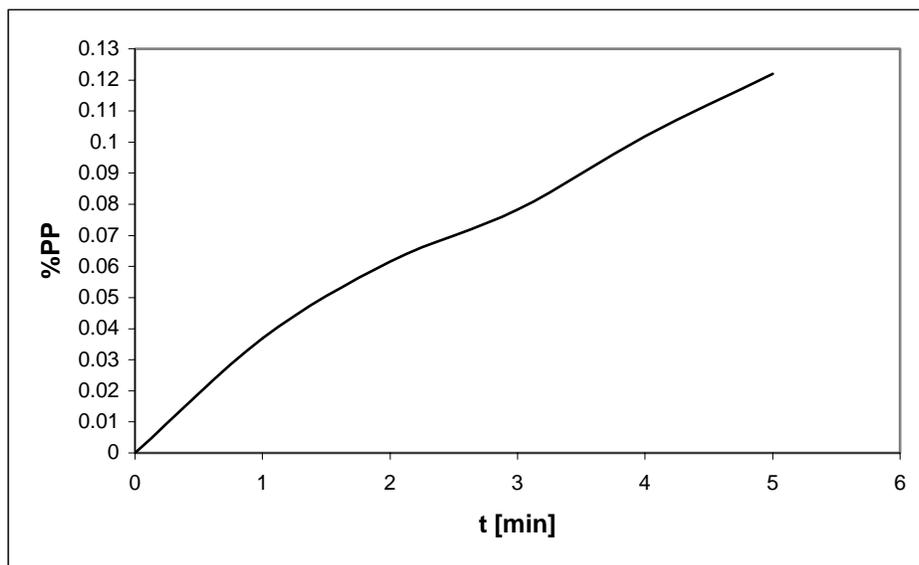


Figura 5.29. Gráfica de la prueba D en el acero sin recubrimiento.

La siguiente gráfica sobrepone los tipos de pruebas anteriores para el acero sin recubrimiento obteniéndose el siguiente comportamiento.

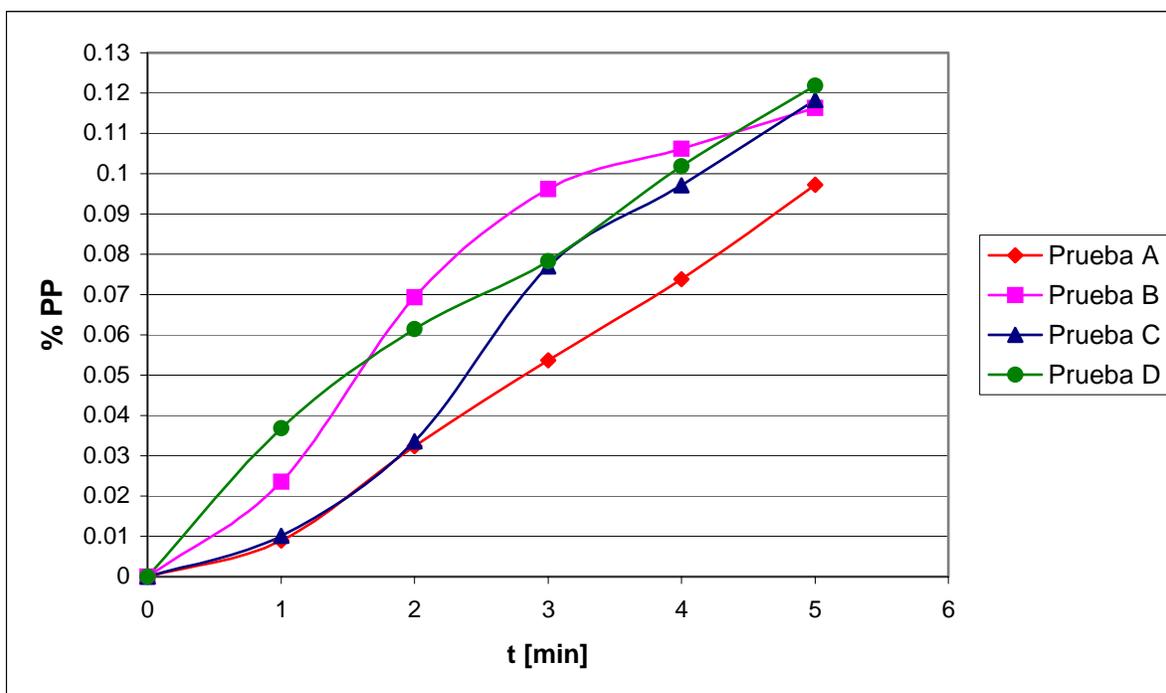


Figura 5.30. Grafica general de todas las pruebas de la probeta de acero sin recubrir. En A: $v=cte$ y $L=cte$, en B: $v=cte$ y $L=var$, en C: $v=var$ y $L=cte$, en D: $v=var$ y $L=var$.

El acero por si solo es homogéneo en cuanto al desgaste, ya que no existe recubrimiento por lo tanto no hay interface, esto hace que la adhesión sea constante en cuanto a la dureza que tiene que vencer.

Los resultados obtenidos demuestran que la prueba B fue la que más pérdida de peso mostró (durante los minutos 2, 3 y 4); esto indica que al incrementar la carga, la fricción entre el acero y el disco aumentó. En este caso, la dureza del disco es superior a la de la superficie de la probeta por lo tanto es de esperarse que la velocidad de desgaste se incrementa al reducirse la dureza.

Por otro lado, nótese que la separación entre las curvas es pequeña en comparación con las curvas de los aceros zinalquizados, esto es debido a que en el acero sin recubrimiento solo hay una sola dureza que resiste, mientras que en los aceros zinalquizados primordialmente son dos: dureza del recubrimiento y dureza de la interface.

V.1. 6. Acero recocido sin recubrimiento.

Prueba A. Velocidad y carga constantes

v = 100 rpm

L = 100 g

Tabla 5.20. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	ΔP [g]	%PP
8.6439	0	0	0
8.6428	1	0.0011	0.0127
8.6412	2	0.0027	0.0312
8.6397	3	0.0042	0.0486
8.6384	4	0.0055	0.0636
8.6375	5	0.0064	0.0740

La masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso son:

$$m_{TA} = 0.0064 [g]$$

$$\%PP_{TA} = 0.0740 [\%]$$

La gráfica resultante es:

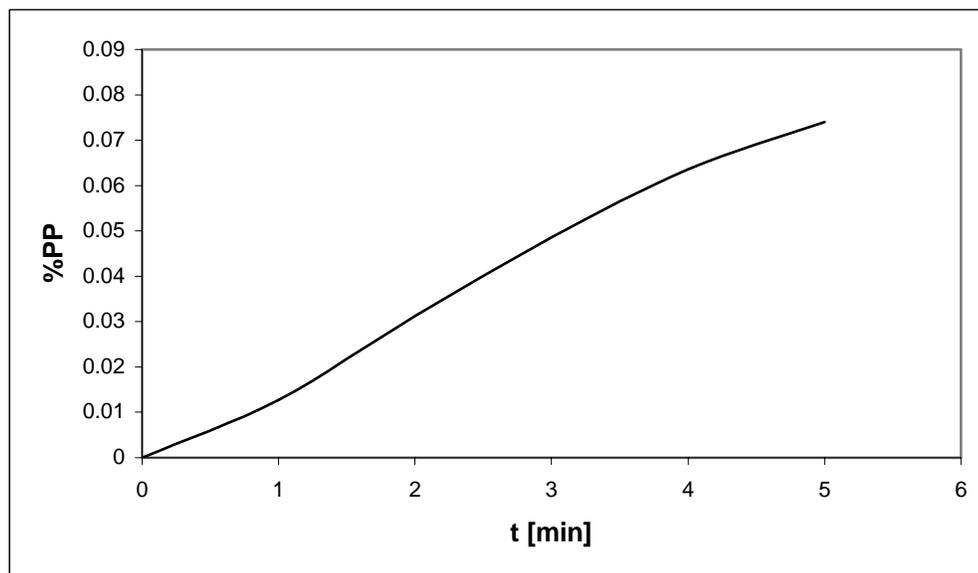


Figura 5.31. Gráfica de la prueba A en el acero recocido sin recubrimiento.

Prueba B. Velocidad constante y carga variable.

$v = 100$ rpm

$L = \text{var.}$

Tabla 5.21. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	L [g]	ΔP [g]	%PP
8.6456	0	0	0	0
8.6447	1	100	0.0009	0.0104
8.6430	2	200	0.0026	0.0300
8.6411	3	300	0.0045	0.0520
8.6397	4	400	0.0059	0.0682
8.6389	5	500	0.0067	0.0775

La masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso son:

$$m_{TB} = 0.0067 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TB} = 0.0775 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

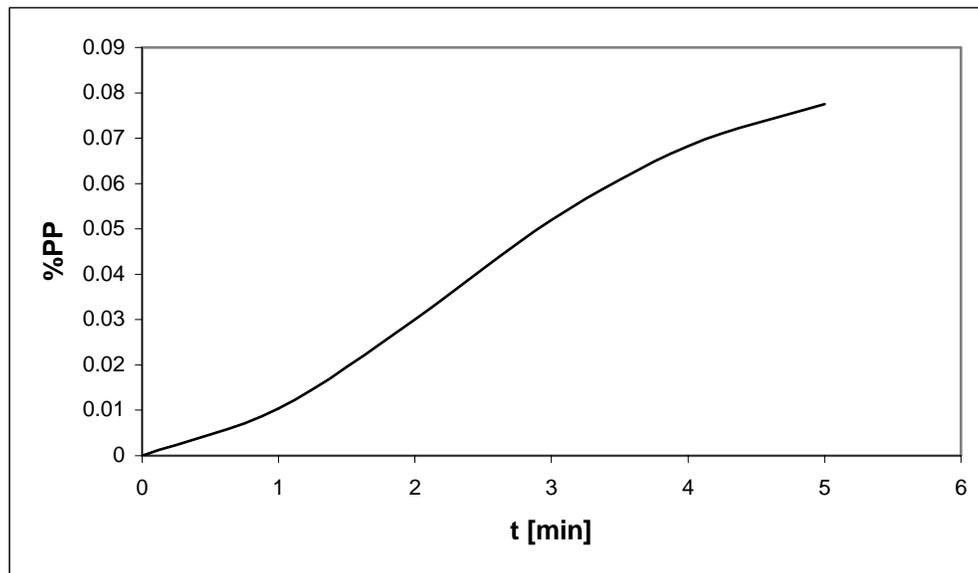


Figura 5.32. Gráfica de la prueba B en el acero recocido sin recubrimiento.

Prueba C. Velocidad variable y carga constante.

v = var.

L = 100 g

Tabla 5.22. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	ΔP [g]	%PP
8.6439	0	0	0	0
8.6435	1	100	0.0004	0.0046
8.6420	2	200	0.0019	0.0220
8.6402	3	300	0.0037	0.0428
8.6389	4	400	0.0050	0.0578
8.6370	5	500	0.0069	0.0798

La masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso son:

$$m_{TC} = 0.0069 \text{ [g]}$$

$$\%PP_{TC} = 0.0798 \text{ [%]}$$

La gráfica es:

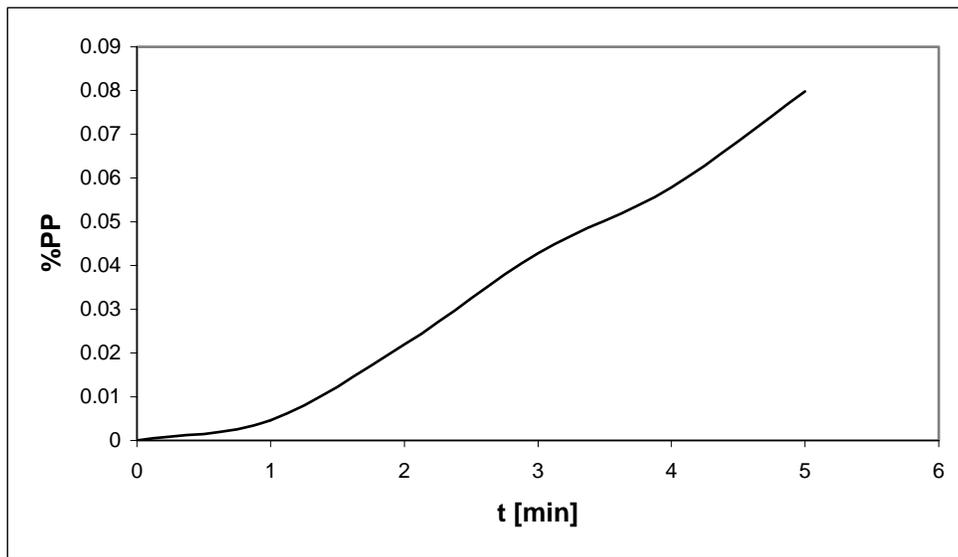


Figura 5.33. Gráfica de la prueba C en el acero recocido sin recubrimiento.

Prueba D. Velocidad variable y carga variable.

v = var.

L = var.

Tabla 5.23. Valores de ΔP y %PP para cada masa en su respectivo tiempo.

m [g]	t [min]	v [rpm]	L [g]	ΔP [g]	%PP
8.6440	0	0	0	0	0
8.6435	1	100	100	0.0005	0.0058
8.6421	2	200	200	0.0019	0.0220
8.6394	3	300	300	0.0046	0.0532
8.6377	4	400	400	0.0063	0.0730
8.6365	5	500	500	0.0075	0.0868

La masa total pérdida y el porcentaje total de pérdida de peso son:

$$m_{TD} = 0.0075 [g]$$

$$\%PP_{TD} = 0.0868 [\%]$$

La gráfica es:

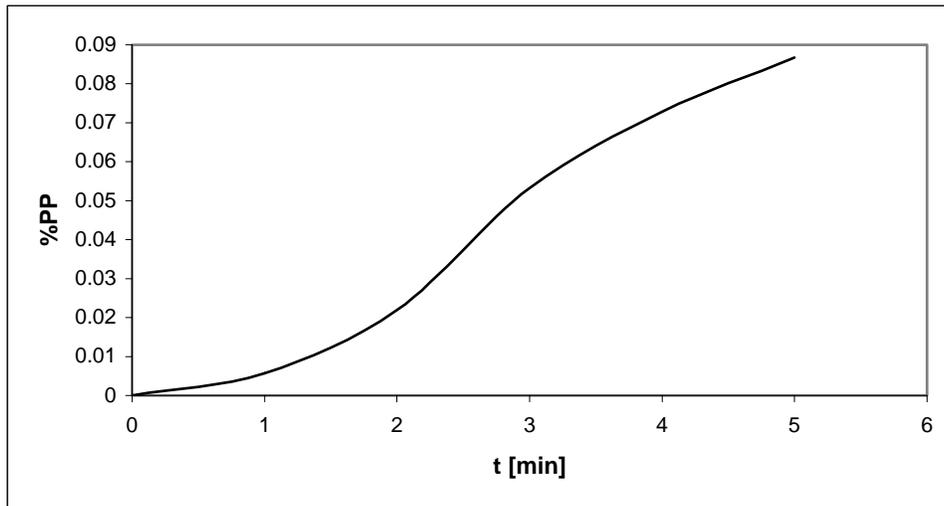


Figura 5.34. Gráfica de la prueba D en el acero recocido sin recubrimiento.

Sobreponiendo las curvas resultantes de las pruebas para el acero recocido sin recubrimiento se tiene el siguiente comportamiento:

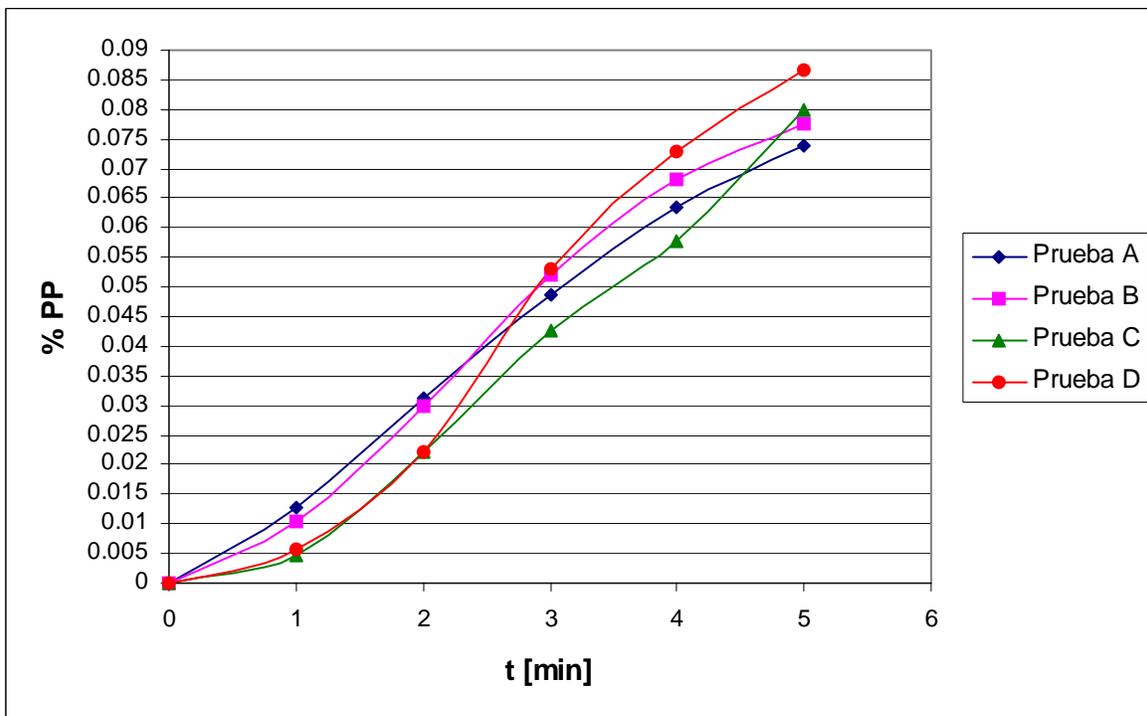


Figura 5.35 Gráfica general de todas las pruebas de la probeta de acero recocido sin recubrir. En A: $v=cte$ y $L=cte$, en B: $v=cte$ y $L=var$, en C: $v=var$ y $L=cte$, en D: $v=var$ y $L=var$.

Concluyendo para esta prueba, como el acero recocido es más dúctil, menos duro y por lo tanto menos rígido, durante el ensayo; no es frágil lo que representa que existe menos desprendimiento de partículas.

El acero recocido presenta también mayor elasticidad ya que en la prueba de desgaste no se presentó gran desprendimiento de partículas. Esto se observa gráficamente en las curvas, ya que se encuentran próximas entre sí.

V. 2. ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CANTIDAD DE PÉRDIDA DE PESO.

En esta parte se presentan aceros zinalquizados referenciados con el acero sin recocer y el acero recocido, para cada una de las distintas pruebas.

La principal finalidad es observar el comportamiento entre el material base recocido y el material base no recocido, dejando a un lado para este estudio la interface.

En esta parte del capítulo se demostrará gráficamente qué tipo de acero presentó mayor resistencia al desgaste por adherencia.

Cualquier juicio será sustentable con base en los datos del apartado anterior (V.1), por ello el motivo de mostrar las gráficas individuales de cada prueba. Por lo tanto se denominará con un número el correspondiente tipo de acero, si es zinalquizado o no lo es, así como el tipo de superficie en cuestión. Ver tabla 5.24.

Tabla 5.24. Denominación del tipo de acero.

Tipo	Acero
1	Recubierto con Zinalco superficie no rasurada.
2	Recubierto con Zinalco superficie rasurada
3	Recocido recubierto con Zinalco superficie no rasurada.
4	Recocido recubierto con Zinalco superficie rasurada.
5	Sin recocer y sin recubrimiento de Zinalco
6	Recocido sin recubrimiento de Zinalco.

V.2.1. Prueba A.

Velocidad constante ($v = \text{cte.}$) y carga constante ($L = \text{cte.}$)

NO RECOCIDOS.

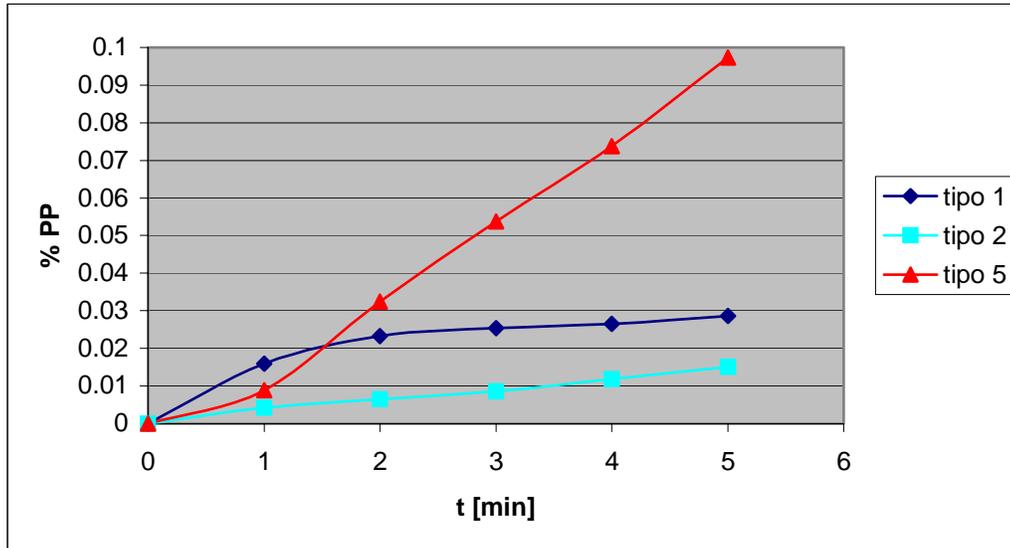


Figura 5.36 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

RECOCIDOS.

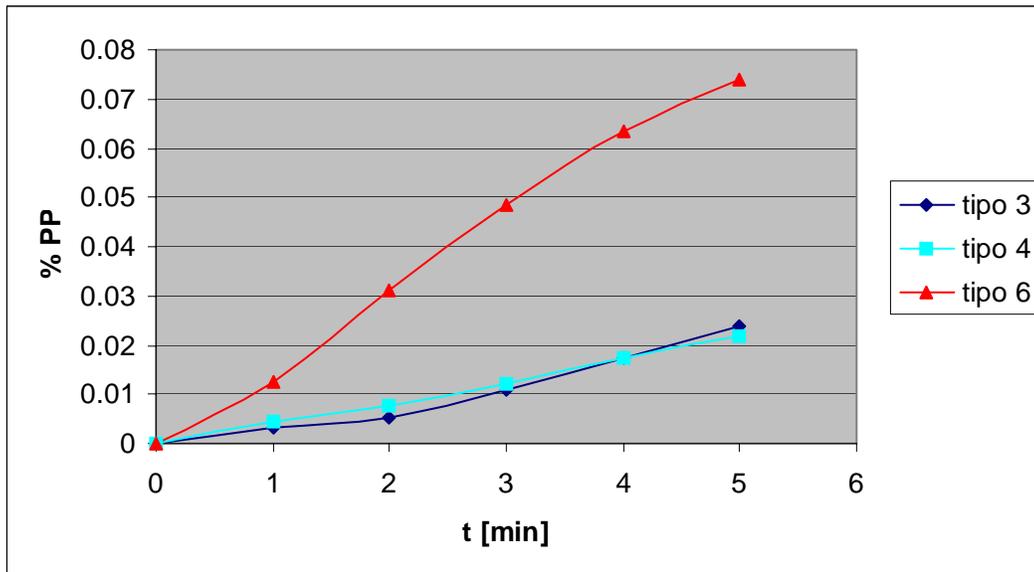


Figura 5.37 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

V.2.2. Prueba B.

La velocidad es constante ($v = \text{cte.}$) y la carga es variable ($L = \text{var.}$)

NO RECOCIDOS.

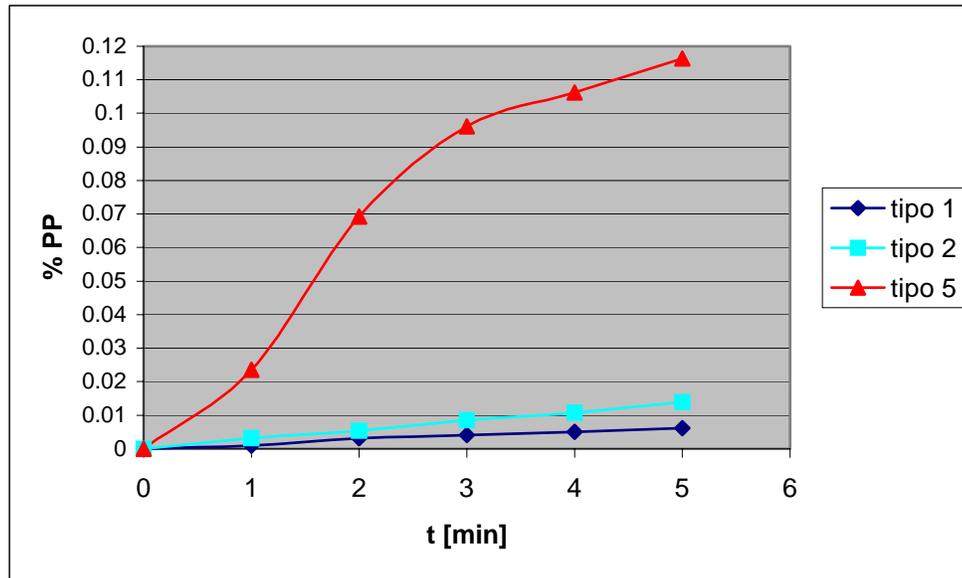


Figura 5.38 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

RECOCIDOS.

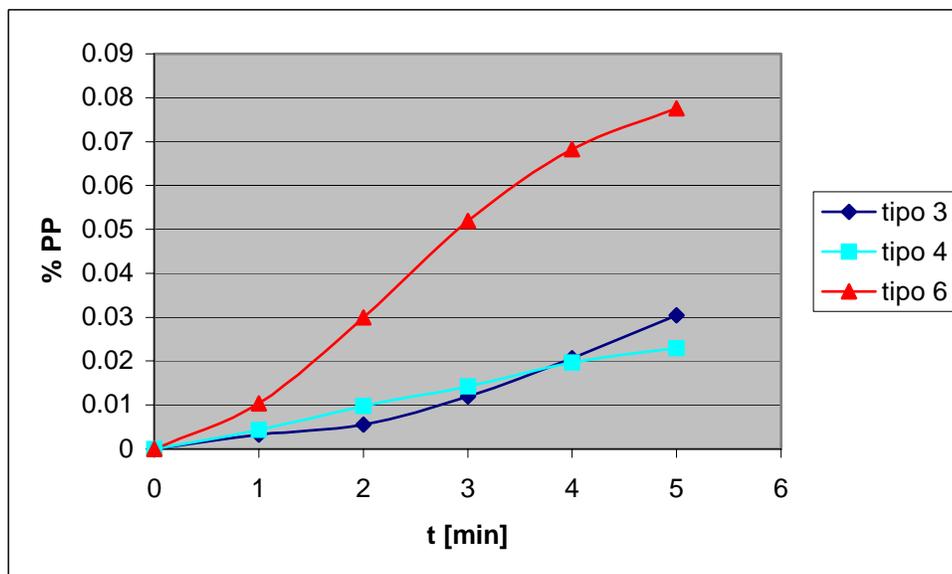


Figura 5.39 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

V.2.3. Prueba C.

La velocidad es variable ($v = \text{var.}$) y la carga es constante ($L = \text{cte.}$)

NO RECOCIDOS.

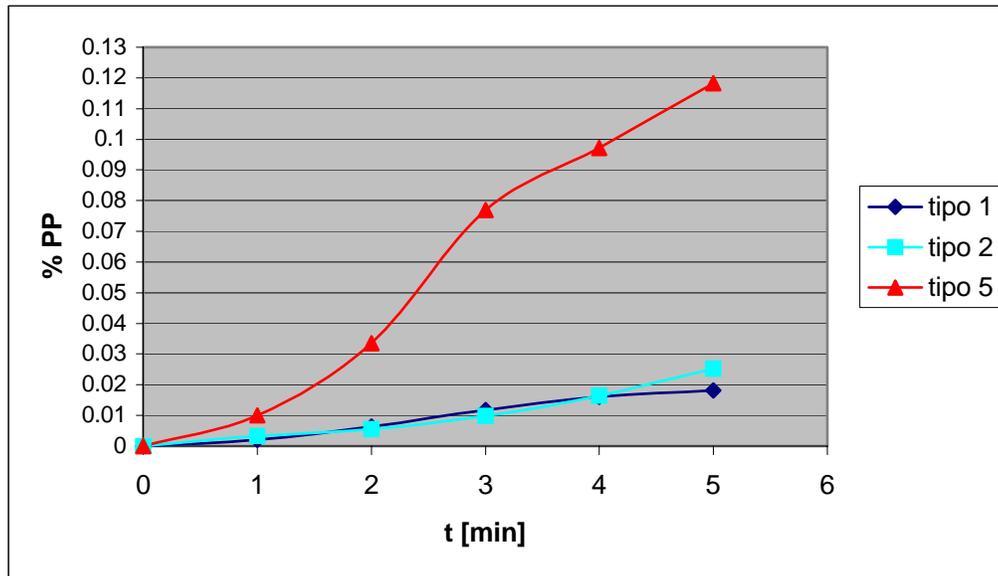


Figura 5.40 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

RECOCIDOS.

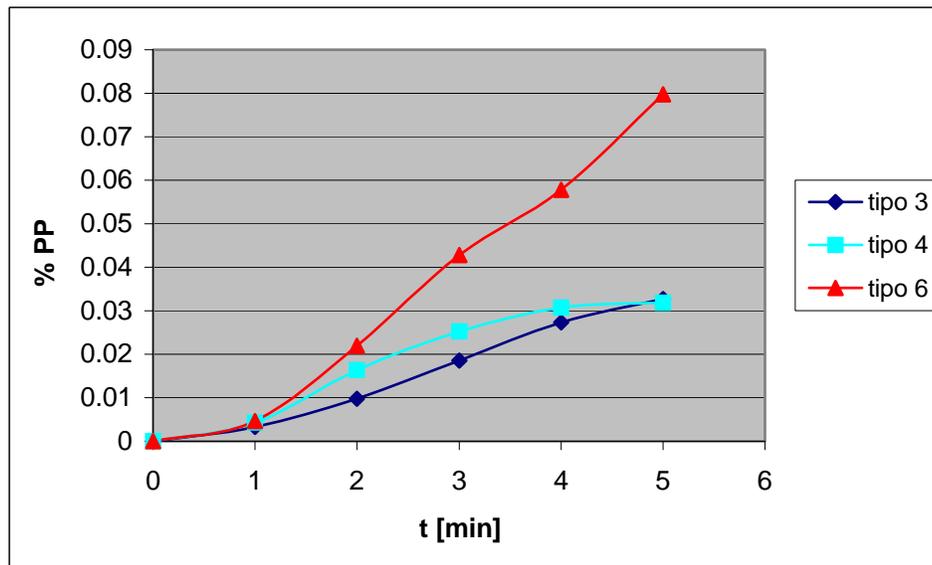


Figura 5.41 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

V.2.4. Prueba D.

La velocidad es variable ($v = \text{var.}$) y la carga es variable ($L = \text{var.}$)

NO RECOCIDOS.

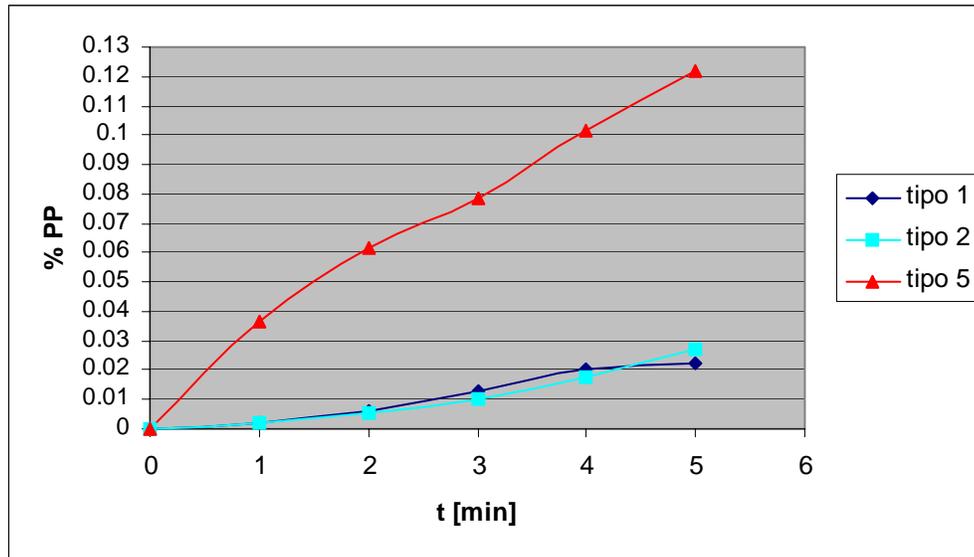


Figura 5.42 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

RECOCIDOS.

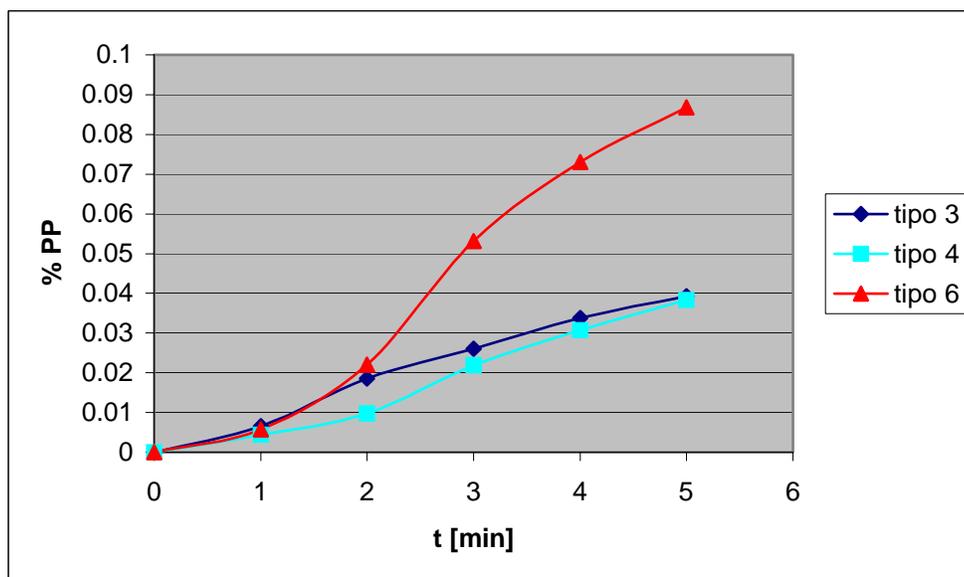


Figura 5.43 Grafica comparativa entre el acero sin recubrimiento (curva roja) y los aceros zinalquizados (curvas azules)

Ya que en la prueba A se mantuvieron velocidad (v) y carga axial (L) constantes, el desgaste no se apresuraba pues la adhesión fue ocasionada por la resistencia del recubrimiento ante el disco.

En las probetas recocidas y no recocidas, el acero sin recubrimiento fue el que más pérdida de peso presentó con respecto a los aceros zinalquizados. Ya que la diferencia de porcentaje de pérdida de peso entre los aceros zinalquizados y los no zinalquizados es de aproximadamente 0.08%, y para los recocidos, la diferencia es aproximadamente del 0.055%, lo que favorece a los aceros recocidos.

Para las pruebas tipo B y C, los aceros zinalquizados no perdieron peso por encima del 0.035% tanto de superficies rasuradas como no rasuradas y nuevamente los aceros sin recubrimientos son los de mucho mayor pérdida de peso.

La prueba D fue considerada la más severa, debido a la variación de la velocidad y carga, pero en efecto la pérdida de peso en los aceros zinalquizados fue un tanto mayor que las otras pruebas; fue tan solo del 0.04%.

En las pruebas en donde la velocidad fue variable (pruebas C y D), se perdió más peso en las probetas de acero zinalquizado recocido que en las probetas de acero zinalquizado no recocido. Este comportamiento aconteció también en la prueba B, por lo que en la prueba de parámetros fijos (prueba A); los aceros zinalquizados recocidos fueron más favorables.

De modo que cuando la velocidad sea variable, no será conveniente someter a un proceso de recocido al acero zinalquizado, empero de que siempre será relativa esta decisión; según el tipo de aplicación deseada en algún diseño de elemento de máquina, por citar un ejemplo.

En todas las pruebas resultó que los aceros sin recubrimiento perdieron mucho más peso que los aceros zinalquizados, no más del 0.13% mientras que su valor mínimo nunca llegó al 0.075%; por lo que los aceros zinalquizados nunca perdieron peso por encima del 0.045% independientemente del tipo de superficie.

En algunos casos existió menor resistencia al desgaste en los aceros sin recocer. La razón es que un acero recocido es más blando y dúctil, la obtención de estas características son las que se logran como resultado de este tratamiento térmico

Parece claro que un material recocido es favorable respecto a un material que no lo es, independientemente del recocido, el acero sin zinalquizar es menos resistente al desgaste con respecto a los aceros que si están zinalquizados, ya que los intermetálicos Al-Fe son duros.

Por el momento esto es comprobado gráficamente, habrá que discutir después de analizar el coeficiente de desgaste y la razón de desgaste.

V. 3. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESGASTE.

La siguiente tabla proporciona valores de K (coeficiente de desgaste) para un rango de combinaciones de deslizamiento; los aceros zinalquizados deslizados sobre un disco de acero para herramientas tipo D2 deben concordar con los valores mostrados en la tabla 5.25 teniendo como finalidad la comparación visual de valores ya existentes del coeficiente de desgaste.

*Tabla 5.25. Coeficiente de desgaste para la combinación de materiales, el primero deslizado sobre el segundo.
Tomada de [4]*

Combinación	K x 10 ⁻³
Cinc sobre cinc	160
Acero al bajo carbono sobre acero al bajo carbono	35
Cobre sobre cobre	28
Acero inoxidable sobre acero inoxidable	21
Cobre sobre acero al bajo carbono	1.5
Acero al bajo carbono sobre cobre	0.5

A continuación se procederá a la obtención del coeficiente de desgaste para las pruebas experimentales de este trabajo con base a la teoría del capítulo dos.

CÁLCULO DE K (coeficiente de desgaste).

Dureza del material: H [Kg/cm²]

Densidad del material: ρ [Kg/cm³]

Volumen de desgaste: V [cm³]

Velocidad: v [rpm]

Carga axial: L [Kg]

Incremento de tiempo: Δt [s]

Distancia de deslizamiento: S [cm]

A partir de la ecuación 2.20

$$S = v \phi \pi \Delta t \dots (2.23)$$

Sustituyendo 2.21 en 2.22 y luego en 2.20 resultará la nueva ecuación 5.1 de K.

$$\Delta P = (P_i - P_f) [\text{Kg}] \dots (2.21) \quad V = \frac{\Delta P}{\rho} \dots (2.22) \quad K = \frac{V H}{L S} \dots (2.20)$$

$$K = \frac{(P_i - P_f) H}{\rho L S} \dots (5.1)$$

1. Acero zinalquizado superficie no rasurada.

Propiedades:

$$\begin{array}{lll} H = 18100 [\text{Kg}/\text{cm}^2] & \rho = 5.4 \times 10^{-3} [\text{Kg}/\text{cm}^3] & \phi = 7 [\text{cm}] \\ P_i = 9.4406 \times 10^{-3} [\text{Kg}] & L = 0.1 [\text{Kg}] & \pi = 3.1416 \\ P_f = 9.4378 \times 10^{-3} [\text{Kg}] & v = 500 [\text{rpm}] & \Delta t = 1 [\text{minuto}] \end{array}$$

Sustituyendo valores en la ecuación 2.23:

$$S = v \phi \pi \Delta t \dots (2.23)$$

$$S = (500 [\text{rpm}]) (7 [\text{cm}]) (3.1416) (1 [\text{min}]); \quad S = 10995.6 [\text{cm}]$$

Sustituyendo valores en la ecuación 5.1:

$$K = \frac{(P_i - P_f) H}{\rho L S} \dots (5.1)$$

$$K = \frac{(0.0094406 [\text{Kg}] - 0.0094378 [\text{Kg}]) (18100 [\text{Kg} / \text{cm}^2])}{(0.0054 [\text{Kg} / \text{cm}^3]) (0.1 [\text{Kg}]) (10995.6 [\text{cm}])};$$

$K = 8.23 \times 10^{-3}$

Entonces, el coeficiente de desgaste del acero zinalquizado superficie no rasurada sobre acero para herramientas tipo D2 es $K = 8.23 \times 10^{-3}$

Las ecuaciones 2.23 y 5.1 fueron programadas en hoja de cálculo, por lo que el desarrollo anterior no se llevará a cabo para los demás tipos de aceros zinalquizados.

Solamente sucederán cambios en las propiedades, razón por la cual se mostrarán junto con su respectivo valor de K.

2. Acero zinalquizado superficie rasurada.

Propiedades:

$$H = 17000 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$\rho = 5.4 \times 10^{-3} \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

$$\phi = 7 \text{ [cm]}$$

$$P_i = 9.2760 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$L = 0.1 \text{ [Kg]}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$P_f = 9.2746 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$v = 500 \text{ [rpm]}$$

$$\Delta t = 1 \text{ [minuto]}$$

$$K = 4 \times 10^{-3}$$

3. Acero recocido zinalquizado superficie no rasurada.

Propiedades:

$$H = 20600 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$\rho = 5.4 \times 10^{-3} \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

$$\phi = 7 \text{ [cm]}$$

$$P_i = 9.1661 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$L = 0.1 \text{ [Kg]}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$P_f = 9.1639 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$v = 500 \text{ [rpm]}$$

$$\Delta t = 1 \text{ [minuto]}$$

$$K = 7.63 \times 10^{-3}$$

4. Acero recocido zinalquizado superficie rasurada.

Propiedades:

$$H = 29700 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$\rho = 5.4 \times 10^{-3} \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

$$\phi = 7 \text{ [cm]}$$

$$P_i = 9.1332 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$L = 0.1 \text{ [Kg]}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$P_f = 9.1312 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$v = 500 \text{ [rpm]}$$

$$\Delta t = 1 \text{ [minuto]}$$

$$K = 10 \times 10^{-3}$$

5. Acero sin superficie recubierta.

Propiedades:

$$H = 20600 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$\rho = 7.86 \times 10^{-3} \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

$$\phi = 7 \text{ [cm]}$$

$$P_i = 8.9421 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$L = 0.1 \text{ [Kg]}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$P_f = 8.9334 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$v = 500 \text{ [rpm]}$$

$$\Delta t = 1 \text{ [minuto]}$$

$$K = 20.7 \times 10^{-3}$$

6. Acero recocido sin superficie recubierta.

Propiedades:

$$H = 19300 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$$

$$\rho = 7.86 \times 10^{-3} \text{ [Kg/cm}^3\text{]}$$

$$\phi = 7 \text{ [cm]}$$

$$P_i = 8.6439 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$L = 0.1 \text{ [Kg]}$$

$$\pi = 3.1416$$

$$P_f = 8.6375 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$v = 500 \text{ [rpm]}$$

$$\Delta t = 1 \text{ [minuto]}$$

$$K = 14.3 \times 10^{-3}$$

En resumen se tiene la siguiente tabla:

Tabla 5.26. Coeficiente de desgaste para la combinación de acero zinalquizado sobre disco de acero para herramienta tipo D2.

Combinación (sobre acero para herramienta tipo D2)	K x 10 ⁻³
Acero zinalquizado superficie no rasurada	8.23
Acero zinalquizado superficie rasurada	4
Acero recocido zinalquizado superficie no rasurada	7.63
Acero recocido zinalquizado superficie rasurada	10
Acero sin zinalquizar	20.7
Acero recocido sin zinalquizar	14.3

V. 4. DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN DE DESGASTE.

La expresión para determinar la razón de desgaste es:

$$R_D = \frac{V \rho}{S} \dots (2.25)$$

Si se sustituye 2.21 en 2.22 y lo que resulte en 2.25 formará la nueva ecuación 5.2 de la razón de desgaste.

$$\Delta P = (P_i - P_f) [\text{Kg}] \dots (2.21) \quad V = \frac{\Delta P}{\rho} \dots (2.22)$$

$$R_D = \frac{P_i - P_f}{S} \dots (5.2)$$

El valor de S se obtiene igual que en el cálculo del coeficiente de desgaste:

$$S = v \phi \pi \Delta t \dots (2.23)$$

$$S = (500 [\text{rpm}]) (7 [\text{cm}]) (3.1416) (1[\text{min}]);$$

$$S = 10995.6 [\text{cm}]$$

1. Acero zinalquizado superficie no rasurada.

$$P_i = 9.4405 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$P_f = 9.4378 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

Sustituyendo:

$$R_D = \frac{(0.0094405[\text{Kg}] - 0.0094378[\text{Kg}])}{10995.6[\text{cm}]}$$

$$R_D = 2.4555 \times 10^{-10} \text{ [Kg/cm]}$$

La ecuación 5.2 fue programada en hoja de cálculo, por lo que el desarrollo anterior no se llevará a cabo para los demás tipos de aceros zinalquizados.

2. Acero zinalquizado superficie rasurada.

$$P_i = 9.2760 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$R_D = 1.2732 \times 10^{-10} \text{ [Kg/cm]}$$

$$P_f = 9.2746 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

3. Acero recocido zinalquizado superficie no rasurada.

$$P_i = 9.1661 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$R_D = 2.0008 \times 10^{-10} \text{ [Kg/cm]}$$

$$P_f = 9.1639 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

4. Acero recocido zinalquizado superficie rasurada.

$$P_i = 9.1332 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$R_D = 1.8189 \times 10^{-10} \text{ [Kg/cm]}$$

$$P_f = 9.1312 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

5. Acero sin superficie recubierta.

$$P_i = 8.9421 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$R_D = 7.9123 \times 10^{-10} \text{ [Kg/cm]}$$

$$P_f = 8.9334 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

6. Acero recocido sin superficie recubierta.

$$P_i = 8.6439 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

$$R_D = 5.8205 \times 10^{-10} \text{ [Kg/cm]}$$

$$P_f = 8.6375 \times 10^{-3} \text{ [Kg]}$$

En resumen se tiene la siguiente tabla:

Tabla 5.27. Razón de desgaste correspondiente al tipo de acero.

Tipo de acero	$R_D \times 10^{-10}$
Zinalquizado con superficie no rasurada	2.4555
Zinalquizado con superficie rasurada	1.2732
Recocido zinalquizado con superficie no rasurada	2.0008
Recocido zinalquizado con superficie rasurada	1.8189
Sin zinalquizar	7.9123
Recocido sin zinalquizar	5.8205

V.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE.

Se observa en las gráficas (figuras 5.36 a 5.43), que los aceros zinalquizados son más resistentes al desgaste que los aceros² sin zinalquizar, sin embargo en esta parte se mostrarán tablas en las cuales se indicará qué tipo de acero presenta mejor resistencia al desgaste, en virtud de la tendencia gráfica, el coeficiente de desgaste y la razón de desgaste.

Elementos suficientes para poder determinar la resistencia al desgaste en los aceros zinalquizados por inmersión en caliente comparados con el acero sin zinalquizar tanto recocido como no recocido.

V.5.1. Resultados gráficos.

Con base en los resultados gráficos, en cada uno de los tipos de aceros y tipos de pruebas, se determinó la resistencia al desgaste mediante la inspección visual entre la sobreposición de las curvas, el desgaste inicial, el desgaste intermedio, la máxima linealidad de la curva, el desgaste máximo y el desgaste final.

Resultando las siguientes tablas que proporcionan el mejor tipo de acero zinalquizado. Así como las respectivas gráficas de barras que hacen alusión a los resultados de dichas tablas.

² Entiéndase por aceros al acero SAE 1018 en sus modalidades de recocido y no recocido.

Tabla 5.28. Mejor resistencia al desgaste bajo las condiciones de la prueba A: v=cte. y L=cte.

Mejor resistencia al desgaste. Prueba A	
Lugar	Tipo de acero
1 ^{er}	Zinalquizado con superficie rasurada
2 ^{do}	Recocido zinalquizado con superficie rasurada
3 ^{er}	Recocido zinalquizado con superficie no rasurada
4 ^{to}	Zinalquizado con superficie no rasurada
5 ^{to}	Recocido sin zinalquizar
6 ^{to}	Sin zinalquizar

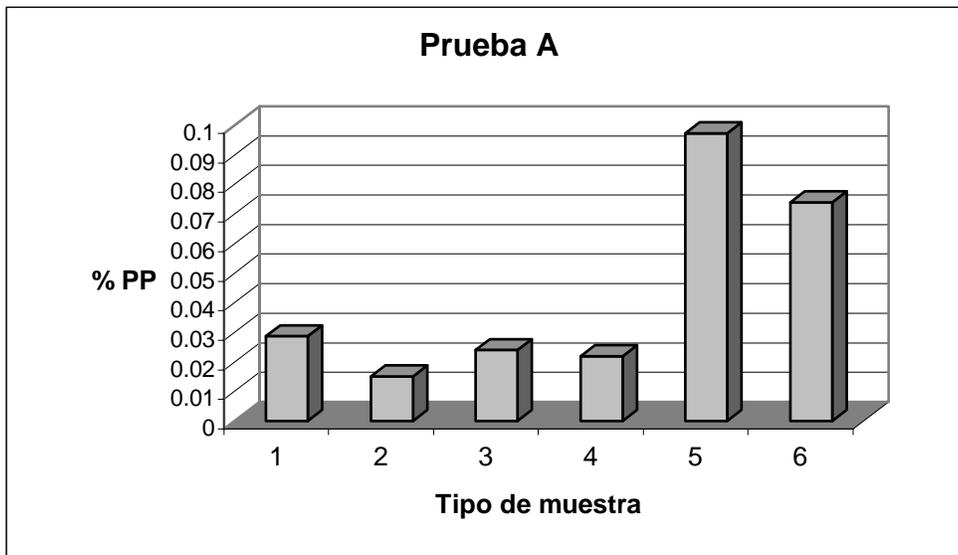


Figura 5.44. Gráfica de la mejor resistencia al desgaste en prueba A: v=cte. y L=cte.

1. Acero zinalquizado superficie no rasurada.
2. Acero zinalquizado superficie rasurada.
3. Acero recocido zinalquizado superficie no rasurada.
4. Acero recocido zinalquizado superficie rasurada.
5. Acero sin zinalquizado.
6. Acero recocido sin zinalquizado.

Tabla 5.29. Mejor resistencia al desgaste bajo las condiciones de la prueba B: $v=cte.$ y $L=var.$

Mejor resistencia al desgaste. Prueba B	
<i>Lugar</i>	<i>Tipo de acero</i>
1 ^{er}	Zinalquizado con superficie no rasurada
2 ^{do}	Zinalquizado con superficie rasurada
3 ^{er}	Recocido zinalquizado con superficie rasurada
4 ^{to}	Recocido zinalquizado con superficie no rasurada
5 ^{to}	Recocido sin zinalquizar
6 ^{to}	Sin zinalquizar

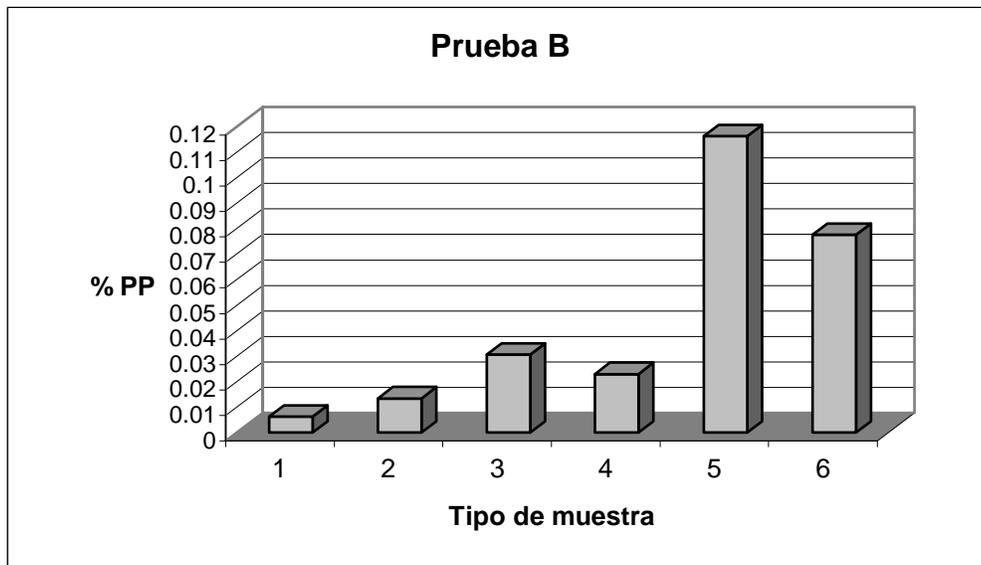


Figura 5.45. Gráfica de la mejor resistencia al desgaste en prueba B: $v=cte.$ y $L=var.$

1. Acero zinalquizado superficie no rasurada.
2. Acero zinalquizado superficie rasurada.
3. Acero recocido zinalquizado superficie no rasurada.
4. Acero recocido zinalquizado superficie rasurada.
5. Acero sin zinalquizado.
6. Acero recocido sin zinalquizado.

Tabla 5.30. Mejor resistencia al desgaste bajo las condiciones de la prueba C: v=var. y L=cte.

Mejor resistencia al desgaste. Prueba C	
<i>Lugar</i>	<i>Tipo de acero</i>
1 ^{er}	Zinalquizado con superficie no rasurada
2 ^{do}	Zinalquizado con superficie rasurada
3 ^{er}	Recocido zinalquizado con superficie rasurada
4 ^{to}	Recocido zinalquizado con superficie no rasurada
5 ^{to}	Recocido sin zinalquizar
6 ^{to}	Sin zinalquizar

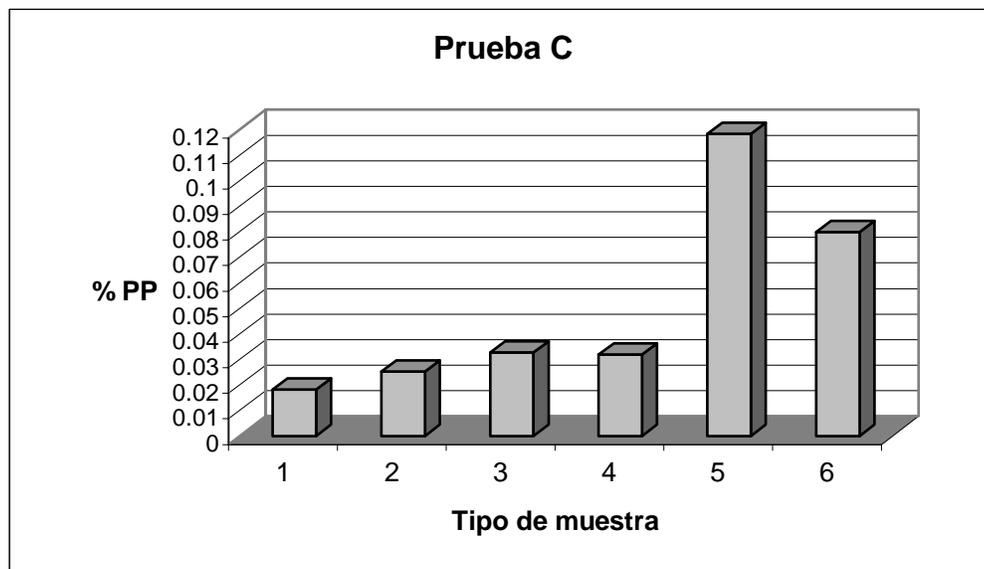


Figura 5.46. Gráfica de la mejor resistencia al desgaste en prueba C: v=var. y L=cte.

1. Acero zinalquizado superficie no rasurada.
2. Acero zinalquizado superficie rasurada.
3. Acero recocido zinalquizado superficie no rasurada.
4. Acero recocido zinalquizado superficie rasurada.
5. Acero sin zinalquizado.
6. Acero recocido sin zinalquizado.

Tabla 5.31. Mejor resistencia al desgaste bajo las condiciones de la prueba D: v=var. y L=var.

Mejor resistencia al desgaste. Prueba D	
<i>Lugar</i>	<i>Tipo de acero</i>
1 ^{er}	Zinalquizado con superficie no rasurada
2 ^{do}	Zinalquizado con superficie rasurada
3 ^{er}	Recocido zinalquizado con superficie rasurada
4 ^{to}	Recocido zinalquizado con superficie no rasurada
5 ^{to}	Recocido sin zinalquizar
6 ^{to}	Sin zinalquizar

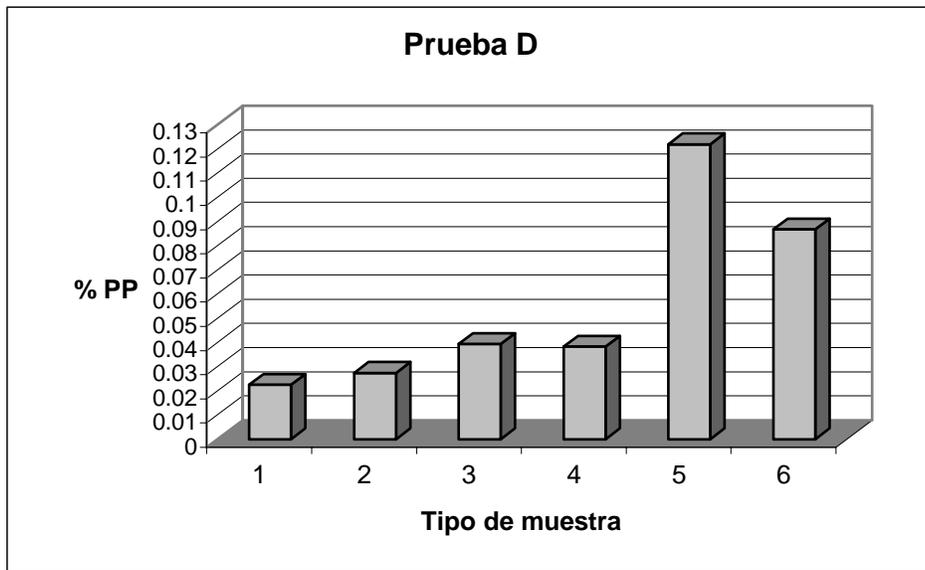


Figura 5.47. Gráfica de la mejor resistencia al desgaste en prueba D: v=var. y L=var.

1. Acero zinalquizado superficie no rasurada.
2. Acero zinalquizado superficie rasurada.
3. Acero recocido zinalquizado superficie no rasurada.
4. Acero recocido zinalquizado superficie rasurada.
5. Acero sin zinalquizado.
6. Acero recocido sin zinalquizado.

V.5.2. Coeficiente de desgaste.

Para el caso del coeficiente de desgaste, el análisis será con base a la observación del menor valor, el cual indicará el tipo de acero con la mayor resistencia al desgaste, pues recordemos que el coeficiente de desgaste K representa la probabilidad de que se forme un fragmento adhesivo. En otras palabras, si la probabilidad es menor; menor será la ocurrencia de que se desprenda un fragmento del recubrimiento debido a la acción mecánica del disco rotatorio, o bien; por el proceso simulado de desgaste.

Tabla 5.32. Mejor resistencia al desgaste con base en el valor del coeficiente de desgaste K .

Mejor resistencia al desgaste.		
<i>Lugar</i>	<i>Tipo de acero</i>	$K \times 10^{-3}$
1 ^{er}	zinalquizado con superficie rasurada	4
2 ^{do}	recocido zinalquizado con superficie no rasurada	7.63
3 ^{er}	zinalquizado con superficie no rasurada	8.23
4 ^{to}	recocido zinalquizado con superficie rasurada	10
5 ^{to}	recocido sin zinalquizar	14.3
6 ^{to}	sin zinalquizar	20.7

V.5.3. Razón de desgaste.

La razón de desgaste indica cuánto material se pierde por cada unidad de desplazamiento, este parámetro es real y de alta confiabilidad aunque de relativa aplicación.

En el capítulo dos se indicó que en la razón de desgaste obtenida mediante análisis de desgaste adhesivo se interpreta de la siguiente manera:

- ☞ Si la razón de desgaste presenta un valor cercano a cero indica que el material es muy resistente al desgaste.
- ☞ Si la razón de desgaste presenta un valor lejano del cero indica que el material no es muy resistente al desgaste.

De la tabla 5.27, el tipo de acero con menor valor de razón de desgaste se obtendrá qué tipo de acero es el más resistente al desgaste. Se puede observar que el tipo de acero con mayor resistencia al desgaste es el zinalquizado con superficie rasurada y en la siguiente tabla se ordenan de mayor resistencia a menor resistencia en cada tipo de acero según la razón de desgaste:

Tabla 5.33. Mejor resistencia al desgaste con base en la razón de desgaste R_D .

Mejor resistencia al desgaste.		
<i>Lugar</i>	<i>Tipo de acero</i>	$R_D \times 10^{-10}$ [Kg/cm]
1 ^{er}	Zinalquizado con superficie rasurada	1.2732
2 ^{do}	Recocido zinalquizado con superficie rasurada	1.8189
3 ^{er}	Recocido zinalquizado con superficie no rasurada	2.0008
4 ^{to}	Zinalquizado con superficie no rasurada	2.4555
5 ^{to}	Recocido sin zinalquizar	5.8205
6 ^{to}	Sin zinalquizar	7.9123

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES.

La realización de este trabajo se generó con base en la sistemática del método científico, y se infiere que durante la experimentación pueden presentarse errores inherentes, los cuales a través de la realización de varias pruebas se buscó disminuirlos casi en su totalidad.

Refiriéndonos al objetivo de este trabajo el cual cita que se debía determinar la resistencia al desgaste en el acero recubierto con Zinalco mediante la realización de pruebas de desgaste adhesivo, ensayos de microdureza y estudios metalográficos. Y con base en el trabajo realizado en este trabajo se logró demostrar la validez de la hipótesis planteada en el Capítulo 1 que suscita lo siguiente: *el proceso de inmersión en caliente para recubrir los aceros de bajo carbono con la aleación Zinalco puede proporcionar mayor resistencia al desgaste que la observada en productos comerciales que actualmente se venden en el mercado.*

En efecto, el acero comercial de bajo contenido en carbono SAE 1018 presentó mucha mayor resistencia al desgaste al estar recubierto con aleación Zinalco mediante el proceso de inmersión en caliente.

1. Para el proceso de recubrimiento mediante la técnica de inmersión en metal fundido, se puede inferir que es fácil de llevar a cabo, de menor costo con respecto a otros procesos de recubrimiento, y presenta óptimos resultados; pues al observar las fotografías del capítulo cuatro (4.1 a la 4.7) se nota que el Zinalco está perfectamente adherido a la superficie del material base; ya que no hay porosidades en la interface.
2. Se establece que en la interface se presentará mayor dureza que en el recubrimiento y que incluso en el material base (ver tabla 4.1), esto solamente se confirma pues en trabajos previos se ha estipulado que muy probablemente a la formación de intermetálicos Al-Fe y Zn-Al-Fe que estarían en la interface [3].
3. El acero sin zinalquizar y sin proceso de recocido no es resistente al desgaste. Recocido mejora; pero nunca más que si estuviera zinalquizado. Tan solo la diferencia promedio de porcentaje de pérdida de peso (%PP) entre el acero recocido y el no recocido es de 0.034%, es decir; el acero sin recocer perderá 0.034% más peso que si estuviera recocido.

4. En los aceros zinalquizados, la mayor resistencia al desgaste fue en la interface; pues al término de la prueba, ésta era la superficie final resultante en donde se concentraban los intermetálicos Al-Fe y Zn-Al-Fe.
5. Entre elementos deslizantes en donde sean constantes la velocidad y una carga axial de alguno de ellos, tendrá mayor resistencia al desgaste el acero zinalquizado con una superficie libre de asperezas (superficie rasurada).
6. Entre elementos deslizantes en donde sea constante la velocidad y una carga axial de alguno de ellos variable, viceversa, y tanto la velocidad como la carga axial variables, se beneficiará con mayor resistencia al desgaste el acero zinalquizado con una superficie que tenga asperezas (superficie no rasurada).
7. Ningún acero recocido zinalquizado superó la resistencia al desgaste obtenida en el acero sin recocer zinalquizado, no obstante la resistencia al desgaste del primer tipo, siempre fue mayor que en el acero sin recubrimiento.
8. La diferencia promedio del porcentaje de pérdida de peso (%PP), entre los peores resultados obtenidos en los aceros zinalquizados y los aceros sin zinalquizar fue del 0.058%
9. Con base en el valor del coeficiente de desgaste K, el acero zinalquizado con superficie libre de asperezas (superficie rasurada) posee la menor probabilidad de desprendimiento de recubrimiento, esto es, el desempeño de resistir el desgaste será sobresaliente.
10. En virtud del criterio de la razón de desgaste, el acero zinalquizado con superficie libre de asperezas (superficie rasurada) presenta mayor resistencia al desgaste.

Se conoce que en un mismo acero, bajo el proceso de recocido presentará menor dureza que al no estarlo. Y aunque esto se debió de esperar, no necesariamente aconteció así porqué:

- ✓ Durante la realización de las pruebas al colocar y extraer la probeta, ésta se impactaba con el disco; se cree que por ser más duras las probetas no recocidas presentaban mayor fragilidad lo que ocasionaba reducción de tenacidad en el intermetálico (interface) y luego el incremento en la pérdida de peso.

- ✓ Debido a que la dureza del disco es mucho mayor en comparación a la dureza de la probeta en su superficie (recubrimiento) e incluso en su interface, no se puede presentar lo esperado; de que un acero no recocido resista más que el recocido, debido a que esa condición solamente es válida cuando tanto el disco y la probeta tienen valores similares de dureza. Resaltando que la probeta de este trabajo no era de un solo material, si no que estaba compuesta por el acero SAE 1018 (material base), el intermetálico Al-Fe (interface) y el Zinalco (recubrimiento).

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.

1. Aceros SISA. "Catálogo de servicio industrial". Editado por SISA S.A. de C.V. México 2007. Archivo electrónico en formato pdf.
2. AHMSA. "Manual de especificaciones y garantías". Editado por Altos Hornos de México. 2004. Archivo electrónico en formato pdf.
3. AXECOL S.A. "Manual de aceros especiales de alto rendimiento". Editado por ASSAB aceros para herramientas. México 2007.
4. Askeland, Donald R. "Ciencia e ingeniería de los materiales". International Thomson Editores, tercera edición. México 1998.
5. Bayer, Raymond G. "Mechanical Wear Fundamental and Testing". Marcel Dekker Inc. E.U.A. 2004.
6. B. Bhushan & B. K. Gupta . "Handbook of Tribology ". Mc Graw-Hill, E.U.A. 1991.
7. Cervantes Cabello, Jose Javier. Tesis "Desarrollo de la tecnología para la obtención y caracterización de aceros de bajo carbono recubiertos con Zinalco". El autor. México 2004.
8. Czichos, H. "A systems análisis data sheet for fricción and wear tests and outline for simulative testing" American Socyety for Metals. E.U.A. 1998.
9. Dieter, G. "Mechanical metallurgy". McGraw-Hill, 3ª ed. E.U.A. 1995.
10. Lipson, Charles. "Importancia del desgaste en el diseño". Limusa Editores. México 1990.

11. Nevarez Vega, Ricardo. Romero Pérez, Luis. Tesis "Estudio tribológico de materiales: el caso Zinalco". El autor. México 1992.
12. Rabinowicz, E. "Friction and wear of materials". John Wiley & Sons. New York, E.U.A. 1995.
13. Sarkar, A. D. "Desgaste de metales". Noriega Limusa. México 1996.
14. Torres V. G., Negrete S. J. "El zinalco y su tecnología". Edición del Instituto de Investigación en Materiales UNAM. 1984.
15. Torres V. G. "Zinalco propiedades y usos". Edición del Instituto de Investigación en Materiales UNAM. 1990.
16. Vázquez A. J. y De Damborenea J. "Curso de Ciencia e Ingeniería de la Superficie de los Materiales Metálicos". CENIM - CSIC, 2000.