

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS D2 Y H13 TRATADOS CON NITRURACION EN BAÑO DE SALES CON Y SIN CAPA BLANCA.**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. González V. Eder F.

Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE  
LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS D2 Y H13 TRATADOS CON  
NITRURACION EN BAÑO DE SALES CON Y SIN CAPA  
BLANCA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Staia, Mariana, H.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de Venezuela

Por el Br. González V. Eder F.

Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2010



Caracas, 09 de noviembre de 2010.

## ACTA

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

**EDER GONZÁLEZ**

*Titulado:*

**“COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE  
LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS D2 Y H13 TRATADOS  
CON NITRURACIÓN EN BAÑO DE SALES CON Y SIN  
CAPA”**

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

**Prof. Juan Carlos Vázquez**  
*Jurado*



**Prof. Crisanto Villalobos**  
*Tutor*

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

## **AGRADECIMIENTOS**

*En cada paso que damos siempre hay algo o alguien que está allí para ayudar, en oportunidades de manera implícita, lo que no permite que nos demos cuenta de su aporte, por esta razón inicio estas breves líneas agradeciendo a todas aquellas personas que de una u otra manera han contribuido con este logro, sin ellas y sin su aporte no fuese llevado a tierra firme este navío.*

*Dios nuestro padre supremo que con su bendición a generado los espacios y oportunidades necesarias para avanzar día a día y en los momentos difíciles ha contribuido con el discernimiento que nos permite tomar las mejores decisiones en cada una de las etapas de nuestras vidas, no puedo olvidar a nuestra Virgen del Valle ya que también es un apoyo espiritual.*

*Avril Alejandra mi mayor inspiración desde que existes cambiaste mi vida, junto a Mari son mis tesoros más preciados y las dos base que completan el trípode estable de nuestra familia, sin su apoyo y desvelos nocturnos este trabajo no fuese sido posible las amo.*

*Papa gracias por estar allí, agradezco tu paciencia y confianza no fue fácil pero aquí esta, Fiorela tu aporte fue uno de los más importantes gracias.*

*Mis amigos de CENMACOR, Carlos, Ángela, Yucelis, Zina y todos los que de alguna manera contribuyeron a la realización de este trabajo mil gracias. Prof. Mariana su paciencia y comprensión permitieron que termináramos este trabajo, siempre estaré agradecido por la oportunidad que me brindo al abirme las puertas de su laboratorio.*

*La cueva y sus integrantes a todos gracias por su apoyo incondicional son parte de mi familia éxito y perseverancia.*

*A todos “Cariño y Cuido”*

**González V. Eder F.**

**COMPORTAMIENTO ANTE EL DESGASTE ABRASIVO DE LOS ACEROS DE HERRAMIENTAS D2 Y H13 TRATADOS CON NITRURACION EN BAÑO DE SALES CON Y SIN CAPA BLANCA**

**Tutor Académico: Prof. Mariana H. Staia. Tesis Caracas, U.C.V.**

**Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2010, pág. 109.**

**Palabras Claves:** tribología, desgaste, abrasión, nitruración aceros para herramientas.

El siguiente trabajo tiene como objetivo estudiar el comportamiento ante el desgaste de los aceros para herramientas AISI D2 y H13 nitrurados en baño de sales, los ensayos se realizaron bajo las siguientes condiciones: muestras del sustrato nitrurado (con capa blanca, con  $\frac{1}{2}$  capa blanca y sin capa blanca) así como del sustrato sin nitrurar. Durante el ensayo, se emplearon cargas normales de 130N y 65 N respectivamente y una velocidad angular de 2000 rpm, para todas las muestras bajo estudio. Con el fin de determinar el grado de desgaste mediante la pérdida en peso, cada muestra fue pesada antes y después del ensayo.

La caracterización de las muestras, una vez realizada la modificación superficial, permitió determinar la dureza característica en función del sustrato empleado. Así mismo, se encontró que una dureza de 916 HV<sub>0,05</sub> y 962 HV<sub>0,05</sub> para el AISI H13 y D2, respectivamente. Se determinó que el espesor de la capa blanca, obtenida como resultado del tratamiento para el acero D2 fue 36 micras, mientras que para el acero H13 de 77 micras. El patrón de desgaste abrasivo para el AISI D2 es similar al del AISI H13, teniendo como diferencia apreciable la pérdida en peso.

Se encontró que la modificación superficial realizada a los aceros estudiados AISI D2 y H13, contribuyen a mejorar el comportamiento ante el desgaste abrasivo de estos aceros en más de un 40% cuando se compara el sustrato con la condición de nitruración con capa blanca; siendo el acero AISI D2 el que presentó un mejor comportamiento superando el 80% de disminución en el volumen de desgaste para esta condición.

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO I</b>	<b>3</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>3</b>
1.1 ACERO PARA HERRAMIENTAS.	3
1.1.1 <i>Aceros para herramientas del grupo "D"</i>	5
1.1.1.1 Características y propiedades generales de los aceros para herramientas del grupo "D"	5
1.1.1.2 Descripción del acero para herramientas AISI D2	6
1.1.2 <i>Acero para herramientas del grupo "H"</i>	7
1.1.2.1 Características y propiedades generales de los aceros para herramientas del grupo "H"	7
1.1.2.2 Descripción del acero para herramientas AISI H13	7
1.2 NITRURACIÓN	8
1.2.1 <i>Influencia de los elementos de aleación en la nitruración</i>	10
1.2.2 <i>Propiedades de los aceros Nitrurados</i>	11
1.2.3 <i>Nitruración en baño de sales</i>	12
1.3 TRIBOLOGÍA	16
1.3.1 <i>Desgaste</i>	17
1.3.1.1 Tipos de Desgaste	18
1.3.1.1.1 Desgaste Abrasivo	18
1.3.1.1.2 Influencia del desgaste abrasivo sobre las propiedades del acero	24
1.3.1.1.3 Efectos del ambiente sobre el desgaste abrasivo	27
<b>CAPITULO II</b>	<b>30</b>
<b>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>30</b>
2.1 DIAGRAMA DE FLUJO	30
2.2 ELABORACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA ENSAYAR	31
2.2.1 <i>Mecanizado y preparación de las muestras</i>	31
2.2.2 <i>Tratamiento superficial</i>	33
2.2.3 <i>Medición de la rugosidad</i>	36
2.2.4 <i>Medición de la dureza</i>	36
2.2.4.1 Medición de la dureza de la sección transversal	37
2.2.5 <i>Eliminación de la capa blanca</i>	38
2.3 CARACTERIZACIÓN TRIBOLÓGICA	38

2.3.1	<i>Ensayo de Abrasión</i>	38
2.3.1.1	Descripción del equipo	39
2.3.1.2	Condiciones para los ensayos	40
2.3.1.3	Procedimiento según la Norma ASTM G 65-81	40
2.3.1.4	Cálculos y reporte de datos	41
2.4	ANÁLISIS DE LA HUELLA DE DESGASTE Y DE LA ARENA ABRASIVA	42
2.4.1	<i>Caracterización de la huella desgastada</i>	42
<b>CAPITULO III</b>		<b>43</b>
<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>		<b>43</b>
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL NITRURADO	43
3.1.1	<i>Perfil de dureza</i>	43
3.1.2	<i>Estudio metalográfico de la capa nitrurada</i>	45
3.1.3	<i>Medición de la rugosidad superficial.</i>	48
3.2	DETERMINACIÓN DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES EN CADA SISTEMA ESTUDIADO	49
3.3	CUANTIFICACIÓN DE LA EXTENSIÓN DEL DESGASTE ABRASIVO GENERADO PARA CADA SISTEMA ESTUDIADO	53
3.3.1	<i>Caracterización tribológica</i>	53
3.3.1.1	Ensayo de desgaste según la Norma ASTM G-65 realizado al acero AISI D2	53
3.3.1.2	Ensayo de desgaste según la Norma ASTM G-65 realizado al acero AISI H13	55
3.3.1.3	Características de la huella desgastada	57
<b>CAPITULO IV</b>		<b>66</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>		<b>66</b>
4.1	CONCLUSIONES	66
4.2	RECOMENDACIONES	68
<b>APÉNDICES</b>		<b>69</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>107</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1 ESQUEMA DE LA NITRURACIÓN	9
FIG. 2 DIAGRAMA FE-N	14
FIG. 3 TIPOS DE CONTACTO DURANTE EL DESGASTE ABRASIVO: (A) DOS CUERPOS ABIERTOS, (B) DOS CUERPOS CERRADOS, (C) TRES CUERPOS CERRADOS Y (D) TRES CUERPOS CERRADOS [11].	20
FIG. 4 CINCO PROCESOS DE DESGASTE ABRASIVO [35].	21
FIG. 5 . FOTOMICROGRAFÍAS DE TRES PROCESOS DE DESGASTE ABRASIVO OBSERVADOS CON UN MICROSCOPIO ELECTRÓNICO. (A) CORTE, (B) APILAMIENTO DE MATERIAL, (C) LABRADO. [35]	23
FIG. 6 RESISTENCIA A LA ABRASIÓN VS. DUREZA DE LOS METALES PUROS Y ALEACIONES. [20]	25
FIG. 8 EFECTO DE LA DUREZA DEL ABRASIVO, RELATIVA A LA DUREZA DEL MATERIAL DESGASTADO, EN LA TASA DE ABRASIÓN	27
FIG. 9 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	30
FIG. 10 EQUIPO PARA DESBASTE MARCA BEUHLER	32
FIG. 11 EQUIPO PARA EMBUTIR BEUHLER SIMPLIMET 2	33
FIG. 12 ESQUEMA DE TRATAMIENTO TÉRMICO REALIZADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN (NITRURACIÓN EN BAÑO DE SALES)	34
FIG. 13 MICROSCOPIO ÓPTICO OLYMPUS PMG3	35
FIG. 14 PERFILÓMETRO ÓPTICO MARCA ZYGO NEW VIEW 200	36
FIG. 15 MICRODURÓMETRO LECO AI3001	37
FIG. 17 ESQUEMA DE LA MÁQUINA PARA REALIZAR ENSAYOS DE ABRASIÓN	39
FIG. 18 PERFIL DE DUREZA DE LAS MUESTRAS DEL ACERO AISI D2 TRATADAS TERMOQUÍMICAMENTE.	44
FIG. 19 PERFIL DE DUREZA DE LAS MUESTRAS DEL ACERO AISI H13 TRATADAS TERMOQUÍMICAMENTE.	44
FIG. 20 MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MO DEL ACERO DE HERRAMIENTA D2 CON TRATAMIENTO DE NITRURACIÓN EN BAÑO DE SALES, CORRESPONDIENTE A LA SECCIÓN TRANSVERSAL, ATAQUE QUÍMICO NITAL 3 %.	46
FIG. 21 MICROGRAFÍAS OBTENIDAS POR MO DEL ACERO DE HERRAMIENTA H13 CON TRATAMIENTO DE NITRURACIÓN EN BAÑO DE SALES, CORRESPONDIENTE A LA SECCIÓN TRANSVERSAL, ATAQUE QUÍMICO NITAL 3%.	47
FIG. 22 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA RUGOSIDAD SUPERFICIAL EN LA ZONA DE ENSAYO DEL ACERO PARA HERRAMIENTA AISI D2, OBTENIDA POR INTERFEROMETRÍA ÓPTICA.	49
FIG. 24 MICROGRAFÍA OBTENIDA POR MEB DEL ACERO AISI D2 (CARGA DE TRABAJO 130 N)	50
FIG. 25 MICROGRAFÍA OBTENIDA POR MEB DEL ACERO AISI H13 (CARGA DE TRABAJO 130 N).	51
FIG. 26 MICROGRAFÍA OBTENIDA POR MEB DEL ACERO AISI D2 (CARGA DE TRABAJO 130 N)	52

FIG. 27 MICROGRAFÍA OBTENIDA POR MEB DEL ACERO AISI H13 (CARGA DE TRABAJO 130 N).	52
FIG. 28 VOLUMEN DESGASTADO EN LAS MUESTRAS DE ACERO PARA HERRAMIENTAS AISI D2	54
TABLA 15. RESULTADOS OBTENIDOS DE LOS ENSAYOS DE ABRASIÓN REALIZADOS A LA MUESTRAS DE ACERO AISI H13.	55
FIG. 30 HUELLA DEL DESGASTE ABRASIVO EN UNA MUESTRA DE ACERO PARA HERRAMIENTAS AISI D2.	57
FIG. 32 IMAGEN OBTENIDA POR MEB DEL ACERO PARA HERRAMIENTA AISI D2 ENSAYADO CON UNA CARGA DE 65 N.	61
FIG. 33 IMAGEN OBTENIDA CON MEB DEL ACERO PARA HERRAMIENTA AISI D2 ENSAYADO CON UNA CARGA DE 130 N.	62
FIG. 34 IMAGEN OBTENIDA CON MEB DEL ACERO PARA HERRAMIENTAS AISI H13 ENSAYADO CON UNA CARGA DE 65 N.	62
FIG. 35 . IMAGEN OBTENIDA CON MEB DEL ACERO PARA HERRAMIENTAS AISI H13 ENSAYADO CON UNA CARGA DE 130 N.	63

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS PARA HERRAMIENTAS SEGÚN AISI	4
TABLA 2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ACERO PARA HERRAMIENTAS AISI D2	6
TABLA 3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI H13	7
TABLA 4. ACERO PARA HERRAMIENTAS AISI D2	31
TABLA 5. ACERO PARA HERRAMIENTAS AISI H13	31
TABLA 6. SECUENCIA PARA DESBASTE RECOMENDADA POR STRUERS.	34
TABLA 7 SECUENCIA PARA PULIDO DESBASTE RECOMENDADA POR STRUERS.	35
TABLA 8 CONDICIONES PARA ENSAYOS DEL AISI D2	40
TABLA 9 CONDICIONES PARA ENSAYOS DEL AISI H13	40
TABLA 10 COMPARACIÓN DE LAS DUREZAS PROMEDIO OBTENIDAS	44
TABLA 11 DUREZA PROMEDIO DE AISI D2 EN DIFERENTES CONDICIONES	45
TABLA 12 DUREZA PROMEDIO DE AISI H13 EN DIFERENTES CONDICIONES	45
TABLA 13 RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS.	48
TABLA 16. CARACTERÍSTICAS DE LA HUELLA DE ABRASIÓN.	58

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto será realizado en el Centro de Ciencias e Ingeniería de Nuevos Materiales y Corrosión, de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales U.C.V.

El desgaste es una falla inevitable, siempre y cuando existan cuerpos en contacto, bajo carga y con movimiento relativo entre sí, trayendo como consecuencia:

- Reducción de la eficiencia de operación.
- Pérdidas de potencia por fricción.
- Incremento del consumo de lubricante.
- y, eventualmente, el reemplazo de componentes desgastados y la obsolescencia de las máquinas en su conjunto.

En función de una amplia variedad de criterios se han logrado definir los tipos de desgaste que ocurren en la industria y cuantificar las fallas que ocurren debido a los mismos, tal como se presenta a continuación:

Abrasión	50 %
Adhesión	15 %
Erosión	8 %
Desgaste micro-oscilatorio	8 %
Desgaste químico	5 %
Otros mecanismos	14 %

Teniendo en cuenta que casi un 65% de las fallas ocurren debido al desgaste por abrasión y desgaste deslizante, se ha decidido profundizar los estudios de desgaste abrasivo, y estudiar específicamente el comportamiento ante este fenómeno de aceros de herramientas en la condición de comercialización, nitruración en baño de sales con/sin Capa blanca. Estos aceros son usados en la fabricación de herramientas de corte para altas velocidades y altas temperaturas.

Es bien conocido, que la dureza es uno de los factores que juega un papel primordial en la resistencia al desgaste de los aceros y que los cambios de dureza en estos materiales se pueden realizar mediante diferentes tratamientos termoquímicos y recubrimientos. El presente trabajo tiene el propósito de determinar no solo la influencia de la nitruración en baño de sales, sino también la influencia de este tratamiento superficial con la capa blanca y sin ella sobre la resistencia al desgaste abrasivo de estos aceros de herramientas.

# **CAPITULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Acero para Herramientas.**

Cualquier acero utilizado como herramienta puede clasificarse como acero para herramientas; sin embargo, el término suele limitarse a aceros especiales de alta calidad utilizados para corte o formado <sup>[1]</sup>.

Se caracterizan por la alta dureza y resistencia a la abrasión, en muchos casos con alta resistencia al trabajo en altas temperaturas, estas características son consecuencia de los altos contenidos de carbono y aleantes.

Generalmente son producidos en hornos eléctricos para una mayor limpieza, mejor control en las condiciones de fundición y economía en la producción de pequeños tonelajes. Debido a su alto contenido de aleantes su comportamiento ante la forja y el laminado no es bueno. Los rigurosos procedimientos de inspección garantizan mejores condiciones de acabado, dureza, tamaño de grano, estructura de recocido y endurecimiento, de igual forma, se le realizan ensayos no destructivos para detectar si existen posibles defectos internos y externos. Es importante, que el acero para herramientas esté libre de descarburización, o como mínimo los niveles de descarburización deben estar cuidadosamente controlados. Esto requiere un procedimiento especial de recocido unido a una cuidadosa inspección.

Los exigentes requerimientos de producción y control de calidad son la razón del alto costo de los aceros para herramientas a parte del costo extra de los elementos aleantes. La insistencia en la calidad de la manufactura está justificada, sin embargo, puesto que estos aceros son destinados para la fabricación de herramientas de corte y formado su valor supera el costo real del acero mismo. Aunque, si bien las diferentes

aleaciones de los aceros estructurales son similares en composición a la de algunos aceros para herramientas, estos pocas veces son usados para la fabricación de herramientas, ya que los mismos no son manufacturados con los requerimientos y control de calidad de los aceros de herramientas <sup>[2]</sup>.

Hay diversos procedimientos para agrupar los aceros de herramientas. Uno de ellos los clasifica en función del medio de temple utilizado: aceros de temple en agua, aceros de temple en aceite y aceros de temple al aire. El contenido en elementos de aleación también puede servir para agrupar los aceros y, en función de él, se dividen en aceros de herramientas al carbono, aceros de baja aleación y aceros de aleación media. Finalmente, en función de la aplicación que van a tener, se clasifican en: aceros para trabajo en caliente, aceros resistentes al impacto, aceros de alta velocidad y aceros para trabajos en frío.

El procedimiento adoptado para clasificar e identificar a los aceros para herramientas de la AISI (American Iron and Steel Institute) tiene en cuenta el tipo de temple, aplicaciones, características particulares y aceros para industrias específicas. Para este caso, los aceros para herramientas que más se usan están clasificados en siete grupo y a cada grupo se le asignó una letra del alfabeto <sup>[1]</sup>.

**Tabla 1 Clasificación de los Aceros para Herramientas según AISI**

<b>GRUPO</b>	<b>SIMBOLO Y TIPO</b>
Templados en Agua	<b>W</b>
Resistentes al Impacto	<b>S</b>
Trabajo en Frio	<b>O</b> Templable en aceite. <b>A</b> Mediana aleación y templable en aire. <b>D</b> Alto carbono, alto cromo.
Trabajo en Caliente	<b>H</b> H1-H19, incluso, base cromo; H20-H39, incluso, base tungsteno; H40-H59, incluso, base molibdeno.
Alta Velocidad	<b>T</b> Base de tungsteno. <b>M</b> Molibdeno.
Moldes	<b>P</b>
Propósitos Específicos	<b>L</b> Baja aleación. <b>F</b> Carbono-tungsteno.

Para efectos de esta investigación los aceros utilizados son el AISI D2 y el AISI H13.

### **1.1.1 Aceros para herramientas del grupo “D”**

Los principales elementos aleantes de este acero son el cromo y el carbono, pero ellos también contienen tungsteno, molibdeno, cobalto y vanadio. Los aceros de este grupo son altamente resistentes al desgaste debido a su dureza, la cual es generada por el alto contenido de carbono, cromo y las pequeñas adiciones de tungsteno y molibdeno <sup>[2]</sup>.

#### **1.1.1.1 Características y propiedades generales de los aceros para herramientas del grupo “D”**

El acero tipo D fue el primer acero desarrollado como posible sustituto de los aceros rápidos usados en herramientas de corte, pero se encontró que tiene insuficiente dureza en caliente y tiende a ser muy frágil para aplicaciones de mecanizado. Sin embargo, el alto contenido de carbono produce un gran volumen de carburos duros, los cuales proveen excelente resistencia al desgaste para aplicaciones de trabajos en frío <sup>[3]</sup>. Se caracteriza también por su buena resistencia a la abrasión, mínima variación de dimensiones en el temple, alta tenacidad, baja maquinabilidad y capacidad de ser nitrurado <sup>[1]</sup>.

El alto contenido de cromo de estos aceros no es suficiente para proveer el nivel de resistencia a la corrosión característico de los aceros inoxidable, porque mucho del cromo es incorporado para la formación del carburo. No obstante, el acero de herramienta tipo D tiene excelente resistencia a la oxidación a altas temperaturas y el alto contenido de cromo de los aceros tipo D proporcionan apreciable resistencia después que las herramientas son endurecidas y pulidas.

### 1.1.1.2 Descripción del acero para herramientas AISI D2

El AISI D2 es un acero trabajado en frío con excelente tenacidad, que al ser nitrurado en baño de sal, mejora significativamente su resistencia al desgaste y lo convierte en un estupendo acero comercial empleado para la fabricación de herramientas de corte (matrices y punzones), herramientas para la técnica de estampado, herramientas para laminar roscas, herramientas para estirar, para embutición profunda y para extrusión en frío <sup>[4]</sup>.

Por el alto contenido de carbono que posee el acero para herramientas AISI D2 (ver tabla 2) lo ubica dentro de los aceros hipereutectoides, según del diagrama de equilibrio Fe-Fe<sub>3</sub>C (ver apéndice 1), debido a que el intervalo de estos últimos está comprendido de 0,8 a 2 % de carbono. El cromo dentro de este acero aumenta el carbono combinado, formando carburos complejos de hierro-cromo más estables que el carburo de hierro, incrementando de esta forma la resistencia, la dureza, la profundidad de la capa de hierro blanco y la resistencia al desgaste y al calor, pero disminuye la maquinabilidad. El molibdeno mejora las propiedades mecánicas y es un leve estabilizador de carburos complejos. Además, mejora la resistencia al desgaste en superficies endurecidas y la tenacidad de la porción interna. El vanadio permite la formación de carburos e inhibe el crecimiento de grano y su función principal dentro del AISI D2 es de mejorar la resistencia al desgaste. El manganeso y el silicio están presentes en el acero como desoxidante <sup>[1]</sup>.

**Tabla 2 Composición química de acero para herramientas AISI D2**

<b>Composición química del acero AISI D2</b>
C% 1.55 - Si% 0.30 - Mn% 0.30 - Cr.% 11.5 - Mo% 0.7 - V% 1.00

### 1.1.2 Acero para herramientas del grupo “H”

Los principales elementos aleantes de este grupo son el cromo, el molibdeno y el tungsteno, debido a que son los responsables de proporcionar al material dureza en caliente. Sin embargo, la suma total del contenido de estos elementos dentro de la composición química debe ser por lo menos el 5% para que dicha propiedad sea apreciable. Los aceros para herramientas de este grupo están diseñados para ser trabajados en caliente, debido a ello, son utilizados en muchas aplicaciones en donde la herramienta se somete a calor excesivo, como la forja en caliente, la extrusión, piezas fundidas en dados y moldeo en plástico <sup>[1]</sup>.

#### 1.1.2.1 Características y propiedades generales de los aceros para herramientas del grupo “H”

- Alta templabilidad.
- Alta resistencia en caliente (resistencia al revenido).
- Buenas propiedades de pulido después de bonificado (temple y revenido).

#### 1.1.2.2 Descripción del acero para herramientas AISI H13

El AISI H13 es un acero con una aplicación universal para trabajar en caliente y es el preferido para la fabricación de herramientas para inyección y fundición a presión con alta velocidad y temperatura por su elevada tenacidad en caliente. Por ejemplo, en la elaboración de camisas de cámaras de presión, pistones, boquillas, bujes, placas, bocinas, émbolos, dados de extrusión <sup>[4]</sup>.

Tabla 3 Composición química del acero AISI H13

---

#### Composición química del acero AISI H13

---

C% 0,39 - Si% 1,00 - Mn% 0.40 - Cr% 5,10 - Mo% 0.7 - V% 1.00

---

El acero AISI H13 posee buena dureza en caliente debido al contenido medio de cromo. Además, este acero contiene elementos formadores de carburo tales como el vanadio y el molibdeno. El manganeso y el silicio se emplean con desoxidante pero, sin embargo, la función principal del silicio dentro de este acero es incrementar la dureza en caliente, es decir le permite al AISI H13 mantenerse duro aun en condiciones de operación en caliente (ver tabla 3). El bajo contenido de carbono y el bajo contenido total de aleaciones proporcionan tenacidad durante el trabajo normal, con valores de dureza que varían desde 40 a 55 Rockwell C. Este acero presenta un endurecimiento profundo y puede endurecerse al aire, hasta la dureza total de trabajado en secciones de hasta 12 pulgadas <sup>[2][5]</sup>.

## 1.2 Nitruración

La nitruración es un proceso termoquímico por el cual la superficie de un metal ferroso es endurecida con nitrógeno para mejorar propiedades mecánicas, tales como su resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga y la corrosión. El nitrógeno que es adsorbido en la superficie del material da lugar a una disolución sólida del compuesto  $Fe_4N$  (hierro – nitruro de hierro), la cual le comunica gran dureza y buena adherencia. La nitruración se puede realizar empleando una atmósfera de gas o por medio de un baño de sales. La efectividad del proceso depende de la formación de nitruros en el acero por la reacción con ciertos elementos de aleación. Aunque, a temperaturas adecuadas todos los aceros son capaces de formar nitruros de hierro, los mejores resultados se obtienen en aquellos aceros que contienen elementos de aleación. Estos elementos son aluminio, cromo y molibdeno <sup>[1][7][10]</sup>.

Una superficie endurecida por nitruración consta de dos zonas distintas. En la zona exterior, los elementos que forman el nitruro. Esta región, varía en espesor hasta un máximo de unos  $50,8\mu m$  y, comúnmente, se conoce como capa blanca debido a su apariencia después de un ataque químico. En la zona por debajo de esta capa blanca, solo los nitruros aleados que han precipitado. La capa blanca es frágil y tiende a

astillarse desde la superficie si tiene un espesor que exceda  $12,7\mu\text{m}$ . Cuando se obtiene una capa blanca con profundidades de  $5,08$  a  $10,16\mu\text{m}$ , no se astilla ni se marca con hoyos, y las características de fricción son excelentes. Esta capa también tiene buenas propiedades de resistencia al desgaste y cabe destacar que mejora la resistencia a la corrosión <sup>[1][7]</sup>.

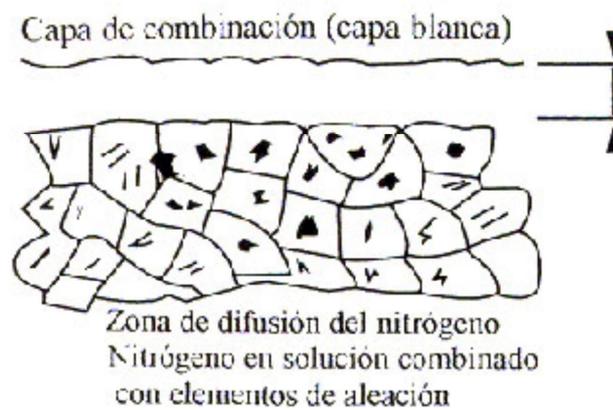


Fig. 1 Esquema de la Nitruración

En el hierro puro o en el acero sin alear, el nitrógeno se difunde en solución sólida durante el proceso de nitruración, produciendo endurecimiento que varía según el enriquecimiento del nitrógeno. La solución sólida se conserva si el metal se enfría rápidamente a partir de la temperatura de nitruración. Por el contrario, si el enfriamiento es lento, los nitruros se precipitan y condicionan una segunda posibilidad de endurecimiento. Los elementos de aleación (formadores de nitruros) presentan una mayor afinidad para formar nitruros cuanto más elevada sea la temperatura de formación de los mismos. La red cristalográfica y sus parámetros cristalinos proporcionan información sobre los intersticios en los cuales se pueden ubicar, terminar y crecer en la matriz ferrítica.

El endurecimiento de la zona de difusión está relacionado con la presencia de elementos de aleación que tienen afinidad por el nitrógeno y que son en su totalidad los mismos elementos formadores también de carburos (cromo, molibdeno, vanadio,

aluminio). El resto de elementos presentes no genera endurecimiento en el proceso de nitruración ya que no permiten la formación de nitruros.

El acero generalmente se endurece y se reviene entre 594 y 704 °C para producir una estructura sorbítica de máxima tenacidad en la parte interna y luego en la parte nitrurada. Como la nitruración se realiza a temperaturas relativamente bajas y no se necesita de templado, la distorsión se reduce a un mínimo, aunque algún crecimiento ocurre debido al aumento en volumen de la superficie endurecida. Sin embargo, este crecimiento es constante y predecible para una pieza de tal modo que, en la mayoría de los casos, las piezas pueden maquinarse muy próximas a sus dimensiones finales antes de la nitruración <sup>[1]</sup>.

### **1.2.1 Influencia de los elementos de aleación en la nitruración**

Si bien es cierto que cualquier tipo de acero se puede nitrurar, no es menos cierto que los elementos de aleaciones en el acero juegan un papel muy importante dentro del proceso de nitruración. El contenido de carbono no influye en la profundidad de la capa nitrurada. Sin embargo, se debe evitar en las piezas la descarburización superficial que debe ser eliminada por mecanizado antes de la nitruración, ya que en las zonas donde el porcentaje de carbono es muy bajo se forman capas con nitruros de hierro que son muy frágiles y pueden ocasionar el desprendimiento de las capas superficiales. El molibdeno aumenta la dureza de la capa exterior, mejora la tenacidad del núcleo y evita la fragilidad que suelen presentar los aceros sin molibdeno al permanecer durante mucho tiempo a temperaturas de 580 °C, esto es el caso en que el acero haya sido previamente templado y revenido. El nitrógeno incrementa la resistencia a la tracción, el límite elástico, la resistencia mecánica en caliente, la dureza, la templabilidad, la resistencia al desgaste, la fragilidad, la tendencia a la segregación, la sensibilidad al envejecimiento y a la corrosión. En la nitruración en baños de sales, es el elemento principal que proviene de la descomposición del cianato mediante aire, este elemento es difundido en el

acero en condiciones adecuadas de temperatura, tiempo, composición química del baño y del acero. El cromo es un intenso formador de carburos y estrecha la región gamma. Cuando se añade para incrementar la resistencia a la corrosión, se debe disolver totalmente en la matriz y no debe formar carburo alguno. El cromo aminora en proporción importante, la velocidad crítica de enfriamiento para el temple, por lo que los aceros que contienen más del 12% de Cr templean incluso por enfriamiento al aire. Este elemento, incrementa la resistencia a la tracción el límite elástico, la resistencia mecánica en caliente, la dureza, la templabilidad, la resistencia a la fatiga, la resistencia al desgaste, la tenacidad, resistencia al calor, la resistencia a la corrosión, a la formación de cascarilla, a la remanencia y a la fuerza coercitiva. Por las mejoras que produce en las propiedades, se le emplea en los aceros para cementar, templar, revenir y para nitrurar, por ser altamente favorecedor de la formación de nitruros. El cromo ayuda a incrementar la capa dura y la influencia del aluminio <sup>[8]</sup>.

### 1.2.2 Propiedades de los aceros Nitrurados

a.- *Resistencia al desgaste.* La mejor resistencia al desgaste la tiene la capa nitrurada con una zona en la cual se formaron los nitruros  $Fe_3N$ ,  $Fe_4N$  y, sobretodo, el  $Fe_3(N,C)$  cuyo contenido de nitrógeno es menor. La presencia del nitruro frágil  $Fe_2N$  empeora la resistencia al desgaste. La resistencia al desgaste de la zona de nitruración interna en los aceros aleados es superior a la del nitruro  $Fe_2N$ , pero inferior al del carbonitruro  $Fe_3(N,C)$ . También, hay que tomar en consideración que un aumento de la dureza no siempre conduce al incremento de la resistencia al desgaste <sup>[34]</sup>.

b.- *Alta resistencia al templado y alta dureza a elevadas temperaturas.* Estas son propiedades valiosas de aceros nitrurados. Después de la nitruración, el acero puede ser calentado hasta la misma temperatura con la cual fue nitrurado para exhibir una excelente resistencia al desgaste y dureza a elevadas temperaturas. Debido a esta combinación de propiedades se puede emplear con buenos resultados para trabajo en

caliente. Sin embargo, el tipo de acero y tiempo de nitruración deben ser adaptados para las condiciones de trabajo.

c.- *Alta resistencia a la fatiga.* En general, la resistencia a la fatiga aumenta con la profundidad de la capa nitrurada y esto se debe en parte al hecho de que durante la nitruración se producen esfuerzos de compresión en la superficie de las piezas.

d.- *Resistencia a la corrosión.* Se ve incrementada como resultado de la nitruración en aceros que no son inoxidable. Sin embargo, en los aceros inoxidables la resistencia a la corrosión se ve considerablemente comprometida debido a la precipitación del cromo en forma de nitruros. La temperatura empleada durante la nitruración puede también desestabilizar al acero inoxidable. La resistencia a la corrosión atmosférica, así como la producida por ambientes marinos puede aumentar solo si se elimina la capa blanca. Lo que indica que esta resistencia es elevada para superficies nitruradas que han sido posteriormente pulidas <sup>[33]</sup>.

### **1.2.3 Nitruración en baño de sales**

La nitruración en baño de sales ha sido, hasta hace muy pocos años, la forma de nitruración más utilizada. Esto se debe, principalmente, al hecho que se realiza con una relativa facilidad, aunado al hecho de que es significativamente más económico, de fácil aplicación. Así mismo, este proceso otorga una alta dureza a las piezas sometidas al tratamiento, manteniendo la dureza a temperaturas elevadas y poca tendencia a deformarse. La acción nitrurante del baño de sales se debe a la formulación equilibrada de sus componentes que, a temperaturas entre 500°C y 600°C, desdobra los cianatos proporcionando la descomposición en nitrógeno (N) y carbono (C). El amoníaco se descompone en nitrógeno e hidrógeno. El hidrógeno, más ligero, se separa del nitrógeno por diferencia de densidad. El nitrógeno liberado por la descomposición del amoníaco forma la atmósfera en el interior del horno que, en contacto con la superficie de hierro y a esa temperatura, forma nitruro de hierro. El

aporte simultáneo de nitrógeno y carbono en la superficie del acero para herramienta da lugar a las ya conocidas capas (capa de combinación o de compuestos formada por nitruros de hierro y la capa o zona de difusión, formada por nitrógeno difundido con los elementos de aleación).

La nitruración en baño de sales fundidas está compuesta de una mezcla típica de sales de sodio y potasio. Las sales de sodio, que representan 60 a 70% (en peso) de la mezcla total, están compuestas por 96.5% de NaCN, 2.5% de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y 0.5% de NaCNO. Las sales de potasio, 30 a 40% (en peso) de la mezcla, consisten de 96% de KCN, 0.6% de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 0.75% de KCNO y 0.5% de KCl. El contenido de cianuro en todos los baños de nitruración es responsable de la disponibilidad del nitrógeno para difundir y la relación de cianuro a cianato es fundamental para llevar a cabo el proceso <sup>[7]</sup>.

Por las características del proceso se registran dos fases: a.) la fase  $\alpha$ , la cual es la ferrita nitrurada con una red cúbica centrada en el cuerpo la cual posee una máxima solubilidad del nitrógeno en hierro  $\alpha$  a la temperatura eutectoide que no supera el 0,10% y b.) la fase  $\gamma$ , la cual es la austenita nitrogenada que posee la red cúbica centrada en las caras y que presente una máxima solubilidad de nitrógeno en la fase  $\gamma$  de 2,8% a 560°C.

Existe en la literatura de especialidad un diagrama similar al Fe-C para las fases de los posibles equilibrios entre el Fe y N, en el que el porcentaje de nitrógeno proyectado en las abscisas sustituye al del carbono las temperaturas prevalecen en el eje de ordenadas <sup>[13]</sup>. El hierro puede formar con el nitrógeno distintas combinaciones y el diagrama Fe-N señala los principales constituyentes que pueden aparecer.

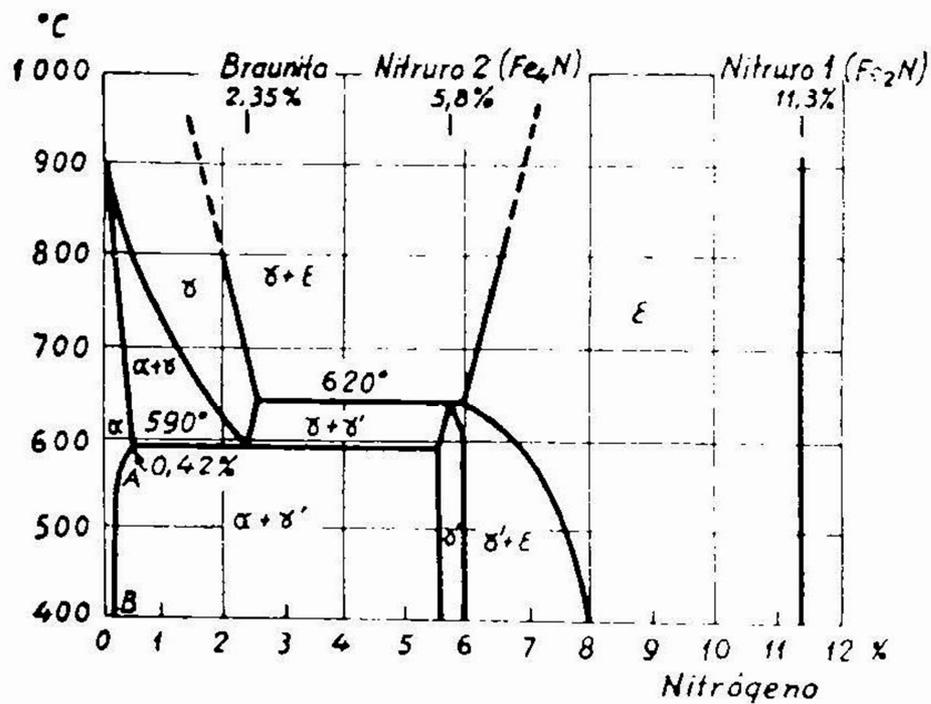


Fig. 2 Diagrama Fe-N

Cabe destacar que las fases presentes que pueden aparecer durante el proceso de nitruración son las siguientes:

a.- **La fase  $\alpha$** , es la ferrita nitrogenada con una red cúbica centrada en el cuerpo y con periodos, según el contenido de nitrógeno, de 0,28664. . 0,2877 $\mu$ m. la solubilidad del nitrógeno en el hierro  $\alpha$  a la temperatura eutécticoide no supera el 0,10%, descendiendo a la temperatura ambiente hasta el 0,004%. La combinación de Fe-N forma un eutécticoide a 590° C del 2,35% N denominado braunita.

b.- **La fase  $\gamma$** , es la austenita nitrogenada, tiene la red cúbica centrada en las caras ( $a = 0,3613$  para 1,45% de N y  $a = 0,3648$  para el 2,79% de N), la solubilidad máxima del nitrógeno en la fase  $\gamma$  es de 2,8% a 560° C la fase  $\gamma$  sufre descomposición eutécticoide  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$ .

En condiciones de un fuerte subenfriamiento la fase experimenta la transformación martensítica formando la fase  $\alpha'$  (martensita nitrogenada) con la red tetragonal centrada en el cuerpo; durante el calentamiento (revenido) la martensita nitrogenada (fase  $\alpha'$ ) se descompone formando primeramente la fase  $\alpha''$  ( $\text{Fe}_{16}\text{N}_2$ ) al aumentar la temperatura de revenido, la fase  $\gamma'$ :  $\alpha' \rightarrow \alpha' + \alpha'' \rightarrow \alpha + \gamma'$ .

c.- **La fase  $\gamma'$** , es la solución sólida a base de nitruro de  $\text{Fe}_4\text{N}$  con la red cúbica centrada en las caras ( $a = 0,3791.. 0,3801\text{nm}$ ) con una zona estrecha de homogeneidad de un 5,3..5,75% de N (según otros datos, un 5,77..5,88% de N); la fase  $\gamma'$  es estable solo hasta  $680^\circ\text{C}$  a una temperatura más alta se forma la fase  $\epsilon$ . Su dureza es 4 a 5 veces más alta que la del hierro puro ( $\text{HV}=800$ ) <sup>[11]</sup>.

Este nitruro no es frágil y se forma por precipitación en enfriamientos muy lentos o revenidos a  $300^\circ\text{C}$  distinguiéndose metalográficamente en la zona de difusión por las clásicas agujas de nitruros.

La cantidad de precipitados  $\text{Fe}_4\text{N}$ , es mayor en los procesos de nitruración en sales que en nitruración gaseosa <sup>[13]</sup>.

d.- **La fase  $\epsilon$** , es la solución sólida intersticial, la base de nitruro  $\text{Fe}_2\text{N}$  y  $\text{Fe}_3\text{N}$  (4,55...11,0% de N), la red cristalina es hexagonal ( $a = 0,2702...0,2764\text{nm}$ ,  $c = 0,433...0,441\text{nm}$ , dependiendo del contenido de nitrógeno). A  $650^\circ\text{C}$  y con una concentración de nitrógeno de 4,5% la fase  $\epsilon$  sufre la descomposición eutectoide en las fases  $\gamma$  y  $\gamma'$ .

A la temperatura de nitruración utilizadas corrientemente, el nitrógeno se disuelve en el hierro solo hasta 0,1%, cuando se excede este valor se forma el nitruro  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ), si la concentración de nitrógeno no excede 6% el nitruro  $\gamma'$  empieza a transformarse en  $\epsilon$ . Por debajo de  $500^\circ\text{C}$  empieza a formarse el nitruro  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_2\text{N}$ ).

Cuando se observan al microscopio óptico las fases  $\gamma'$  y  $\epsilon$ , después de atacada la probeta con Nital de 2 a 5% se ven como una capa superficial blanca. Simultáneamente con el aumento del espesor de la capa blanca durante la nitruración,

el nitrógeno se difunde más en el acero. Cuando se excede el límite de solubilidad, los nitruros se precipitan en los límites de grano y sobre ciertos planos cristalográficos.

Los nitruros  $Fe_{2-3}N$  son muy frágiles y constituyen el principal componente de la "capa blanca" que puede formarse en la nitruración gaseosa. Sin embargo, durante el proceso de nitruración por medio de sales, este nitruro no está presente debido a que el nitrógeno difuso a través de los cianatos no alcanza porcentajes tan elevados para formar dicha fase (N=11.41%).

Entre los elementos de aleación se usan Al, Cr, Mo, como formadores de nitruros, mientras el nitrógeno junto con el carbono permite la formación de los carbonitruros.

La nitruración en baño de sales responde a una serie de exigencias físico-metalúrgicas, tales como: dureza, resistencia al desgaste y una aceptable tenacidad. Estas son las propiedades que mayormente caracterizan a las capas así obtenidas. Dichas propiedades son difíciles de evaluar; ya que pueden venir condicionadas por una elevada porosidad en la zona de difusión de la capa así nitrurada, porosidad que se puede, eventualmente, disminuir o minimizar mediante una racional optimización y funcionalidad de los baños de sales. La nitruración en baños de sales se realiza a una temperatura comprendida entre 570 y 580° C, con un tiempo de nitruración máximo de tres (3) horas; con lo que se alcanza unos excelentes resultados en la capa nitrurada, bajo un punto de vista físico-metalúrgico, ya que son capas de relativo poco espesor (< igual a 0,1 mm), duras, muy compactas, y aceptablemente tenaces<sup>[7]</sup>.

### **1.3 Tribología**

El término "tribología" fue introducido en 1966 en un reporte intitulado "Lubricación (Tribología)" elaborado por el Departamento Británico de Educación y Ciencia y su introducción se basó en un reconocimiento de la naturaleza multidisciplinaria de los estudios que involucran a los fenómenos interfaciales de dos

superficies que funcionan en contacto permanente o intermitente y en movimiento relativo. Mediante una traducción exacta de la raíz griega de la palabra la tribología se define como el estudio del roce o deslizamiento. Buckley indica que la tribología involucra la adhesión, fricción, desgaste y lubricación de sólidos en contacto. El significado moderno y más amplio del término es el de ciencia y tecnología de la fricción, lubricación y desgaste. Otra definición dada por la ASM indica que la tribología es la ciencia y tecnología de superficies que interactúan en movimiento relativo y de las prácticas relacionadas a ello <sup>[11, 14, 15]</sup>.

### **1.3.1 Desgaste**

Existen dos conceptos claves para definir el desgaste. El primero lo define como el daño a una superficie sólida, generalmente con pérdida progresiva de material, debido al movimiento relativo entre la superficie y una(s) sustancia(s) en contacto con ella. El segundo concepto indica que el desgaste es una pérdida progresiva de sustancia de la superficie operativa de un cuerpo que ocurre como resultado de un movimiento relativo en la superficie <sup>[11]</sup>.

La primera definición no excluye necesariamente el daño localizado por la soldadura de las asperezas en estado sólido entre superficies que deslizan, sin fusión local superficial, que posteriormente se rompen y producen un arrugamiento superficial que puede ser de dos formas: en su forma leve denominada arrugamiento o en su forma severa en la cual se producen rayas o canales denominada acanalamiento, en el cual el material de la superficie puede ser desplazado pero no removido; sin embargo, la segunda definición requiere que la sustancia sea removida para ser considerado como desgaste. Algunas veces el daño superficial, definido en tribología, como el daño de una superficie sólida resultante del contacto mecánico con otra sustancia, superficie o superficies moviéndose relativamente a ella y que involucra desplazamiento o remoción de material, es diferenciado del desgaste definido de la primera manera, y la ASM los trata en forma individual. En cierto contexto, el

desgaste es una forma de daño superficial en el cual el material es removido progresivamente y, en otro contexto, el daño superficial involucra el deterioro en función de la superficie de un sólido aunque no exista pérdida de material de la superficie. El daño superficial puede por lo tanto preceder al desgaste <sup>[11]</sup>.

### **1.3.1.1 Tipos de Desgaste**

De acuerdo a diversos investigadores <sup>[30, 31, 32]</sup>, todos los procesos de desgaste están representados por cuatro tipos:

- a) Adhesivo.
- b) Abrasivo.
- c) Fatiga superficial.
- d) Corrosivo.

En adición a estos cuatro principales mecanismos de desgaste existen otros mecanismos especiales, como la erosión por partículas sólidas, la erosión por líquidos, la erosión por cavitación, la erosión por una suspensión, el desgaste microoscilatorio, el desgaste por contacto rodante, el desgaste por impacto, el desgaste por oxidación y el desgaste por arco eléctrico inducido, los cuales pueden ser descritos en forma general como variaciones de los mecanismos principales. Para efecto de esta investigación solo se describirá el desgaste abrasivo.

#### **1.3.1.1.1 Desgaste Abrasivo**

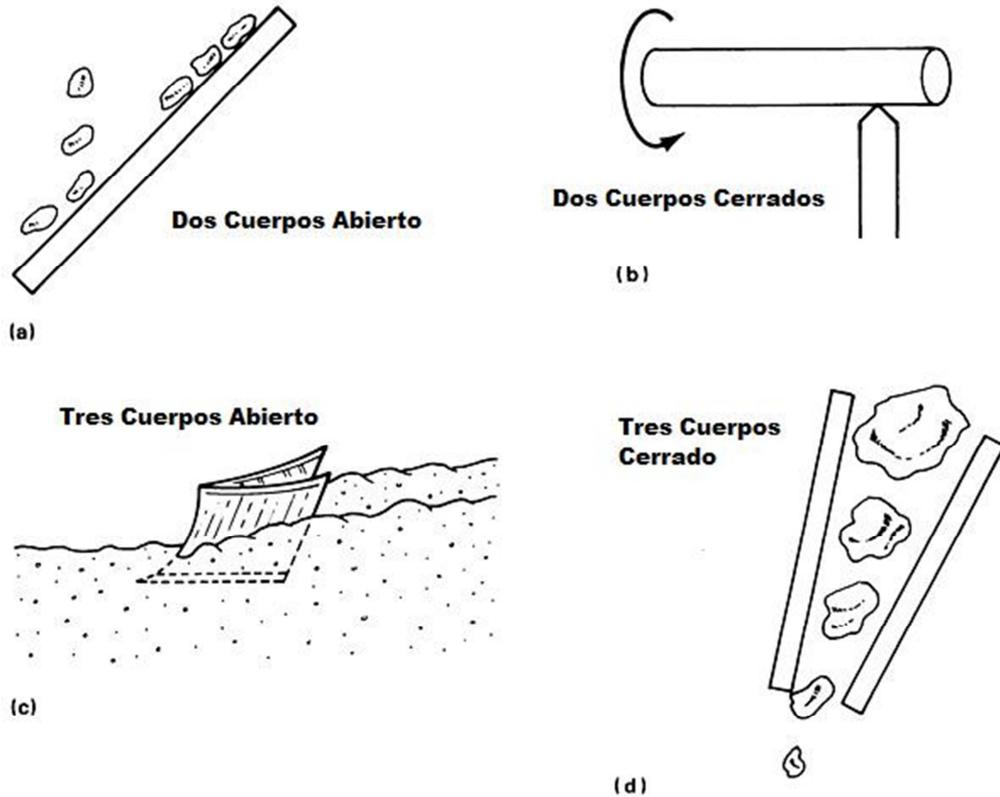
El desgaste abrasivo, algunas veces denominado simplemente abrasión, se puede definir, como el desgaste debido a partículas o protuberancias duras que son forzadas contra una superficie sólida y movidas a lo largo de la misma <sup>[11]</sup>. El desgaste abrasivo también se puede definir como el desgarre o desprendimiento de

pequeñas virutas de una superficie sólida que se caracteriza por la creación de surcos bien definidos sobre la misma por la acción de las partículas abrasivas (incluyendo aquellas formadas por la oxidación de la superficie desgastada) entre el par tribológico <sup>[16]</sup>.

Los costos por abrasión son elevados y han sido estimados del 1 al 4 % del producto interno bruto de un país industrializado. Los efectos producidos por la abrasión son particularmente evidentes en áreas industriales como agricultura, minería, procesamiento de minerales y esencialmente donde existe el manejo de suciedad, arenas y rocas. La velocidad a que las superficies se desgastan por abrasión depende de muchas variables, entre las que se encuentran las propiedades de ambas superficies como dureza, módulo elástico, resistencia a la fluencia, temperatura de fusión, estructura cristalina, microestructura y composición; las características del ambiente que rodea al sistema de desgaste como son la presencia de abrasivos entre las superficies, tipo, dureza, tenacidad y tamaño del abrasivo, temperatura, velocidad de contacto, carga, humedad y efectos corrosivos. En resumen, la velocidad de desgaste no es inherente al material <sup>[35, 18]</sup>.

La abrasión se clasifica de acuerdo a los tipos de contacto y de acuerdo al ambiente de contacto. Los tipos de contacto incluyen desgaste de dos cuerpos y desgaste de tres cuerpos (ver figura 3). El primero ocurre cuando un abrasivo se desliza a lo largo de una superficie y el último cuando un abrasivo es atrapado entre una superficie y otra. Los sistemas de dos cuerpos experimentan de 10 a 1000 veces más pérdidas que los sistemas de tres cuerpos para una carga en particular y para una trayectoria de desgaste, debido a que durante la abrasión de tres cuerpos, las partículas abrasivas son capaces de rotar sin adoptar orientaciones de corte, a diferencia de la abrasión de dos cuerpos, donde la rotación de las partículas no es permitida. Con respecto a los ambientes de contacto se tienen ambientes abiertos (libres) o cerrados (restringidos). Las investigaciones han demostrado que para una carga y longitud de desgaste dada, la tasa de desgaste es aproximadamente la misma para los sistemas abiertos y cerrados. Sin embargo, las mediciones de pérdida de

material en los sistemas cerrados, con frecuencia parecerán mayores a las de los sistemas abiertos, debido a que la mayoría de los sistemas cerrados experimentan mayores cargas <sup>[35]</sup>.



**Fig. 3 Tipos de contacto durante el desgaste abrasivo: (a) dos cuerpos abiertos, (b) dos cuerpos cerrados, (c) tres cuerpos cerrados y (d) tres cuerpos cerrados [11].**

De igual forma, la abrasión a menudo es clasificada como proceso de abrasión de bajo esfuerzo, alto esfuerzo y de canales. La abrasión de bajo esfuerzo ocurre cuando el abrasivo permanece relativamente intacto, debido a que el esfuerzo aplicado no lo fractura, tal como es el caso de lijar madera con papel abrasivo. La abrasión de alto esfuerzo existe cuando las partículas abrasivas son trituradas por el esfuerzo aplicado, por ejemplo, en un molino de esferas donde tanto las esferas como el mineral a triturar son desgastados. En la abrasión por canales, un abrasivo

relativamente grande corta el material que no está completamente endurecido por trabajo en el proceso donde se desempeña el material <sup>[35]</sup>.

Diversos mecanismos han sido propuestos para explicar como el material es removido de una superficie durante la abrasión. Estos mecanismos incluyen fractura, fatiga y fusión. Debido a la complejidad del proceso de abrasión, ningún mecanismo por sí sólo explica completamente todas las pérdidas. La figura 4, describe algunos de los procesos que son posibles cuando una punta abrasiva sencilla se mueve en una superficie. Ellos incluyen el labrado, apilamiento de material, corte, microfataiga y microagrietamiento.

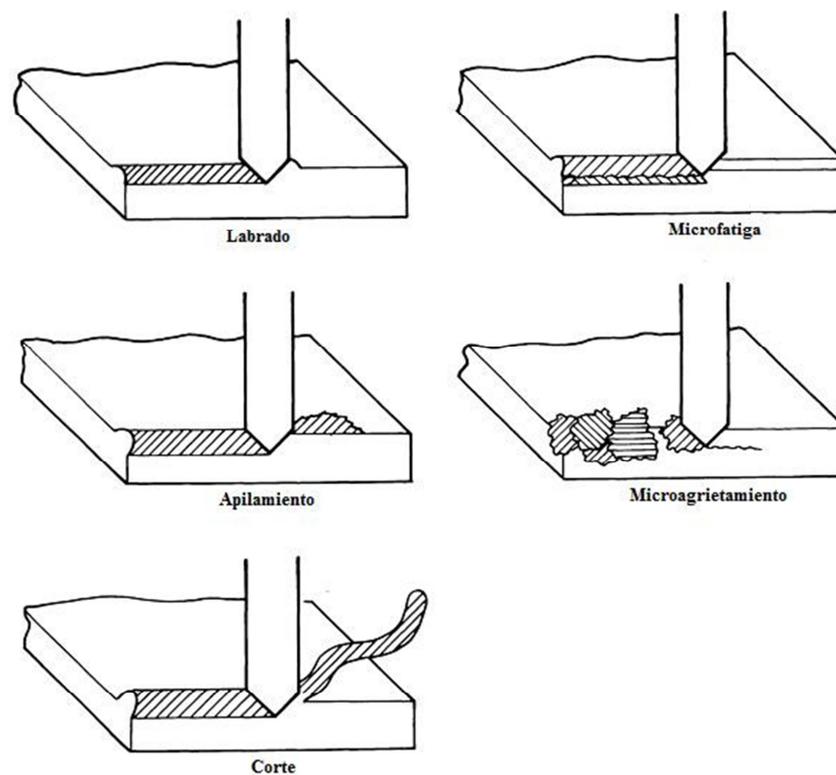


Fig. 4 Cinco procesos de desgaste abrasivo [35].

El labrado es el proceso de desplazamiento de material hacia los lados del canal que se forma por el paso del abrasivo, involucrando la deformación plástica del material. Esto ocurre bajo cargas ligeras y no resulta en pérdida de material. El daño se genera cerca de la superficie mediante el apilamiento de dislocaciones debido al trabajo en frío. Si se producen rayas posteriores sobre esta superficie trabajada en frío, entonces el trabajo adicional podría resultar en la pérdida a través de microfatiga.

Cuando la relación entre la resistencia al esfuerzo cortante de la interface del contacto y la resistencia al esfuerzo cortante del resto de material se incrementa hasta un nivel lo suficientemente alto (desde 0,5 hasta 1), se ha encontrado que puede desarrollarse un apilamiento de material en la parte frontal de la punta abrasiva; en este caso, la totalidad del material desplazado desde el canal es mayor al material desplazado hacia los lados del mismo. Este apilamiento de material, sigue siendo una forma moderada de desgaste abrasivo.

La forma más severa de desgaste para materiales dúctiles es el proceso de corte o abrasión cortante, ya que durante los procesos de corte la punta abrasiva elimina parte de material en forma de partículas, pero el desplazamiento de material es pequeño comparado con el tamaño del surco. Para una partícula abrasiva puntiaguda, existe un ángulo crítico, el cual representa la transición entre el labrado y el corte.

Para materiales dúctiles, los mecanismos de labrado, apilamiento de material y corte, intervienen en el proceso de abrasión (ver figura 5). Se ha encontrado que el grado de penetración de los granos abrasivos es responsable de la transición entre el proceso de labrado y el proceso de corte o micro-maquinado. Cuando el grado de penetración (definido como la profundidad de penetración dividida entre el área de contacto), es mayor de 0.2, el proceso de corte constituye el mecanismo de desgaste predominante.

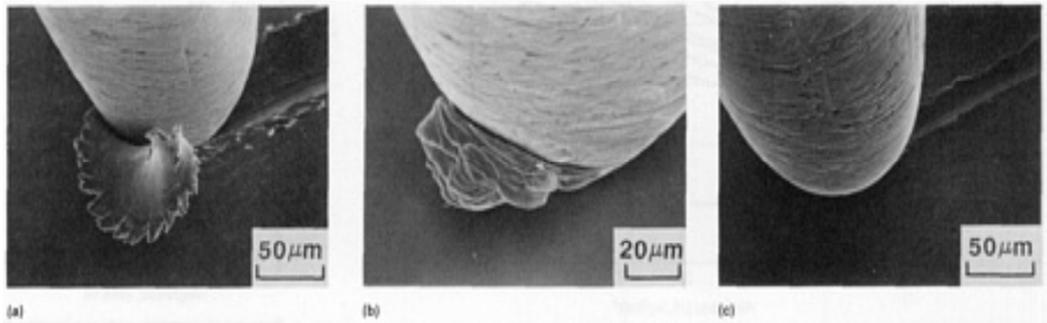


Fig. 5 . Fotomicrografías de tres procesos de desgaste abrasivo observados con un microscopio electrónico. (a) Corte, (b) apilamiento de material, (c) labrado. [35]

Cuando un grano abrasivo actúa sobre una superficie durante el proceso de corte, el volumen máximo desgastado obtenido está representado por la siguiente ecuación:

$$W = Ad \quad (1)$$

Donde;  $W$  es el volumen de material removido;  $A$ , el área de la sección transversal del surco; y  $d$ , la distancia deslizada. El área de la sección transversal del surco  $A$ , depende de la forma del grano abrasivo y de la profundidad de penetración,

$$A = K_1 p \quad (2)$$

Donde;  $K_1$  es una constante que depende de la forma y por consiguiente, la profundidad de penetración  $p$  también depende de la forma del grano, la carga  $L$ , y la dureza  $H$  del material:

$$p = \frac{K_2 L}{H} \quad (3)$$

Muchos factores afectan la constante  $K_1$  tales como el predominio del proceso de labrado o de corte, el deslizamiento de los granos abrasivos los cuales pueden minimizar su acción de corte y la fractura de las partículas que pueden incrementar el número de aristas de corte efectivas.

Las ecuaciones (1) y (3) pueden combinarse para obtener:

$$W = K_3 \frac{Ld}{H} \quad (4)$$

Esta ecuación es comúnmente conocida como la ecuación de Archard, concebida originalmente para ser aplicada en casos de desgaste adhesivo pero que además ha sido útil en el estudio del desgaste abrasivo.

#### **1.3.1.1.2 Influencia del desgaste abrasivo sobre las propiedades del acero**

Se ha demostrado teórica y experimentalmente, que la dureza de los metales está estrechamente relacionada con la tasa de desgaste abrasivo de los mismos, bajo la acción de un medio abrasivo determinado. Khrushchov realizó una gran cantidad de pruebas <sup>[19]</sup>, encontrando que la resistencia a la abrasión es directamente proporcional a la dureza superficial en el caso de los materiales puros y en aceros totalmente recocidos (ver figura 6). A su vez, realizó pruebas en aceros con una variedad de tratamientos térmicos y durezas, encontrando que los aceros se apartan de dicha línea de proporcionalidad, mostrando menor resistencia al desgaste para una misma dureza.

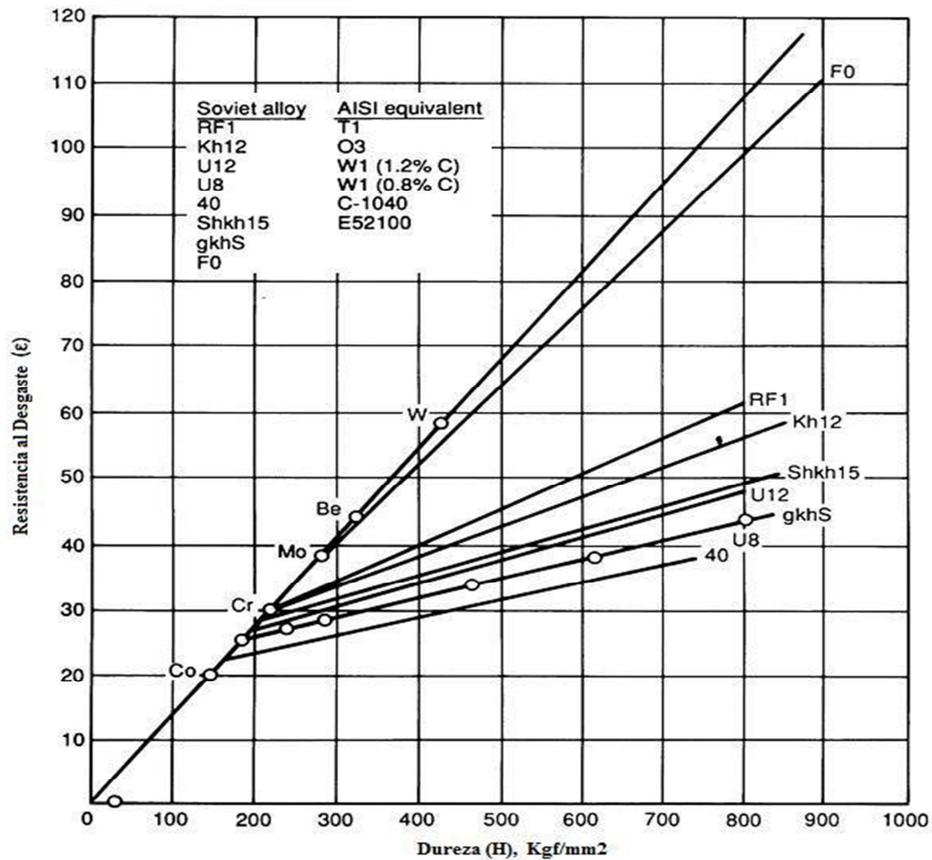
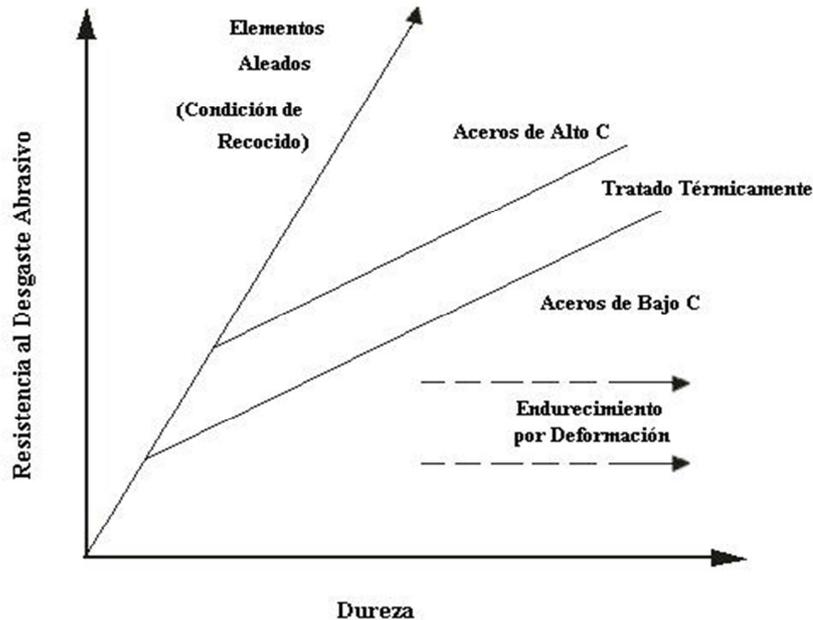


Fig. 6 Resistencia a la Abrasión vs. Dureza de los Metales Puros y Aleaciones. [20]

Comúnmente, se piensa que durante el proceso de abrasión la superficie es endurecida en gran medida por deformación. Richardson <sup>[21]</sup>, investigó el endurecimiento por deformación producido por el labrado de partículas abrasivas sobre un grupo de metales puros y aceros. En su trabajo comparó la dureza resultante de las superficies ensayadas con las mismas superficies endurecidas por bombardeo de perdigones, y concluyó que la abrasión produce una dureza casi cercana a la que se obtiene con dicho procedimiento. Además, verificó que la resistencia al desgaste es función directa de la “dureza efectiva” de la superficie que resulta de la acción destructiva de las partículas abrasivas, la cual no depende de la capacidad de endurecimiento por deformación del metal bajo las condiciones impuestas. Otros autores también han reconocido la importancia de la tasa de endurecimiento por deformación en la disminución de la abrasión de los metales, por lo que el

endurecimiento de las superficies por métodos mecánicos no mejora la resistencia al desgaste [22, 23, 24]. Krushkov y Babichev [22], demostraron que los aceros endurecidos por deformación son menos resistentes a la abrasión que los aceros recocidos a una dureza dada (ver figura 7).



**Fig. 7** Representación esquemática de los efectos de la condición estructural en la resistencia al desgaste abrasivo de los aceros. Según Kruchshov y Babichev [22].

En general, los aceros de mayor dureza poseen mayor resistencia al desgaste abrasivo [22, 25, 20]. Gore y Gates [26], al someter distintos metales a la prueba de abrasión de arena seca y disco de caucho (ASTM G65) en una amplia gama de durezas (desde 79 HV para el aluminio y 1766 HV para el carburo de tungsteno), confirmaron una correlación bastante cercana entre la tasa de desgaste y la dureza del volumen. Sin embargo, otros autores han demostrado que la correlación inversamente proporcional entre la dureza y la tasa de abrasión no se cumple en todos los casos, especialmente en metales no puros como el acero y otros materiales de ingeniería, ya que las características microestructurales de los mismos también juegan un papel importante [23].

### 1.3.1.1.3 Efectos del ambiente sobre el desgaste abrasivo

La dureza de las partículas abrasivas es importante en la tasa de abrasión del material sometido a desgaste. A medida que la dureza del abrasivo excede la del material en desgaste, la tasa de abrasión generalmente aumenta, tal como se muestra en la figura 8. Cuando la dureza del abrasivo excede la del material, éste será capaz de penetrar en la superficie, cortando y removiendo material sin que sus extremos punzantes se rompan o redondeen.

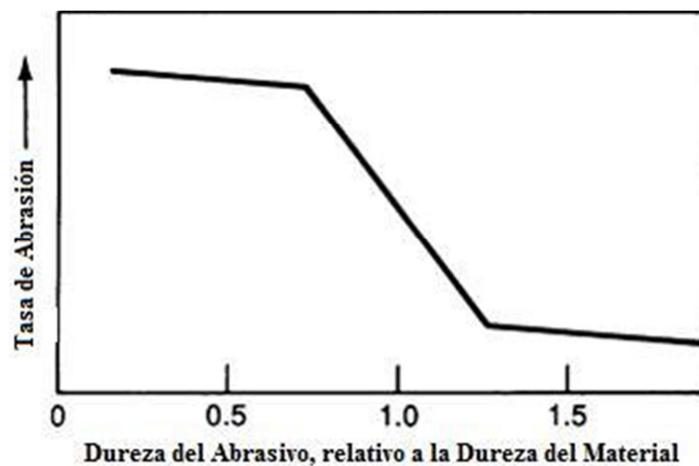


Fig. 8 Efecto de la Dureza del Abrasivo, Relativa a la Dureza del Material Desgastado, en la Tasa de Abrasión

La forma de las partículas también es importante en el proceso de desgaste abrasivo, ya que influyen directamente en la forma del canal producido en la superficie. Asimismo, influye en la carga de contacto y en la transición de contacto elástico a plástico. Diversos experimentos han confirmado que el desgaste disminuye cuando los materiales son abrasionados por partículas redondeadas en vez de puntiagudas. La tenacidad de las partículas abrasivas también merece ser destacada. En general, la pérdida de material se incrementa cuando la tenacidad del abrasivo aumenta. Avery<sup>[24]</sup> realizó estudios de desgaste severo sobre hierros blanco y aceros utilizando dos abrasivos diferentes (calcedonia y silicio) de la misma dureza. Aunque la calcedonia y el silicio tienen la misma dureza (en la escala *Mohs* 7), la calcedonia, siendo más tenaz, causó de dos a tres veces el desgaste registrado para el silicio.

Podría esperarse que el desgaste abrasivo incrementa con la temperatura, debido a que la dureza y el esfuerzo de fluencia disminuyen. Sin embargo, se ha determinado que la tasa de desgaste abrasivo de los metales varía muy poco al elevar la temperatura ambiental. Para explicar dicha relación, ha sido propuesto que durante la abrasión, pequeñas áreas son calentadas adiabáticamente. A temperaturas iniciales mayores, el esfuerzo de fluencia en el metal es reducido, resultando en un menor calentamiento del material durante el proceso de abrasión. El resultado final es que las áreas alrededor del material que es removido tendrán una temperatura similar, independiente de la temperatura inicial y, por ende, la tasa de abrasión varía muy poco con la temperatura.

Se ha encontrado que la tasa de desgaste abrasivo aumenta muy ligeramente con la velocidad, dentro del intervalo de 0 a 2,5 m/s, efecto atribuido al calentamiento por fricción. El calentamiento durante la abrasión tiende a ser adiabático, lo cual sugiere que la temperatura máxima alcanzada en los pequeños volúmenes de material donde actúan las partículas abrasivas, es prácticamente independiente de la velocidad. Ha sido demostrado que el desgaste abrasivo es proporcional a la carga, siguiendo la ecuación de Archard. Sin embargo, este efecto proporcional no es válido cuando la carga es lo suficientemente elevada como para provocar la fractura de las partículas abrasivas, originando nuevos puntos de corte que aumentan aún más el desgaste. Si por el contrario, las partículas abrasivas son redondeadas por la carga, el desgaste disminuirá.

El efecto de la humedad atmosférica sobre el desgaste abrasivo aún está lejos de ser clarificado, ya que existen resultados contradictorios. Larsen-Basse <sup>[26, 27]</sup> estudió el efecto de la humedad atmosférica sobre el desgaste abrasivo de una variedad de metales puros y aceros. Usando SiC como abrasivo, observó que el desgaste aumenta con la humedad, comportamiento atribuido a la fractura asistida por la humedad de las partículas de SiC que produce nuevas aristas cortantes. Mercer <sup>[28]</sup> obtuvo resultados muy diferentes, encontrando que con incrementos de la humedad, el desgaste abrasivo disminuye para el hierro y acero templado.

Generalmente, el desgaste abrasivo es mayor en condiciones corrosivas, particularmente a bajos PH atribuido a la sinergia entre los procesos de abrasión y corrosión. La abrasión origina nuevas superficies aptas para la corrosión, y la capa protectora de óxido es normalmente removida por la abrasión. Usando abrasivos en suspensión, Madsen <sup>[29]</sup> demostró que el desgaste producido por la acción conjunta de un abrasivo y un compuesto corrosivo es dos veces mayor al desgaste originado por los componentes individualmente.

## CAPITULO II

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 2.1 Diagrama de Flujo

La secuencia sistemática implementada para evaluar el comportamiento ante el desgaste abrasivo de los aceros de herramientas D2 y H13 tratados con nitruración en baño de sales con y sin capa blanca se presenta a continuación (ver figura 9).

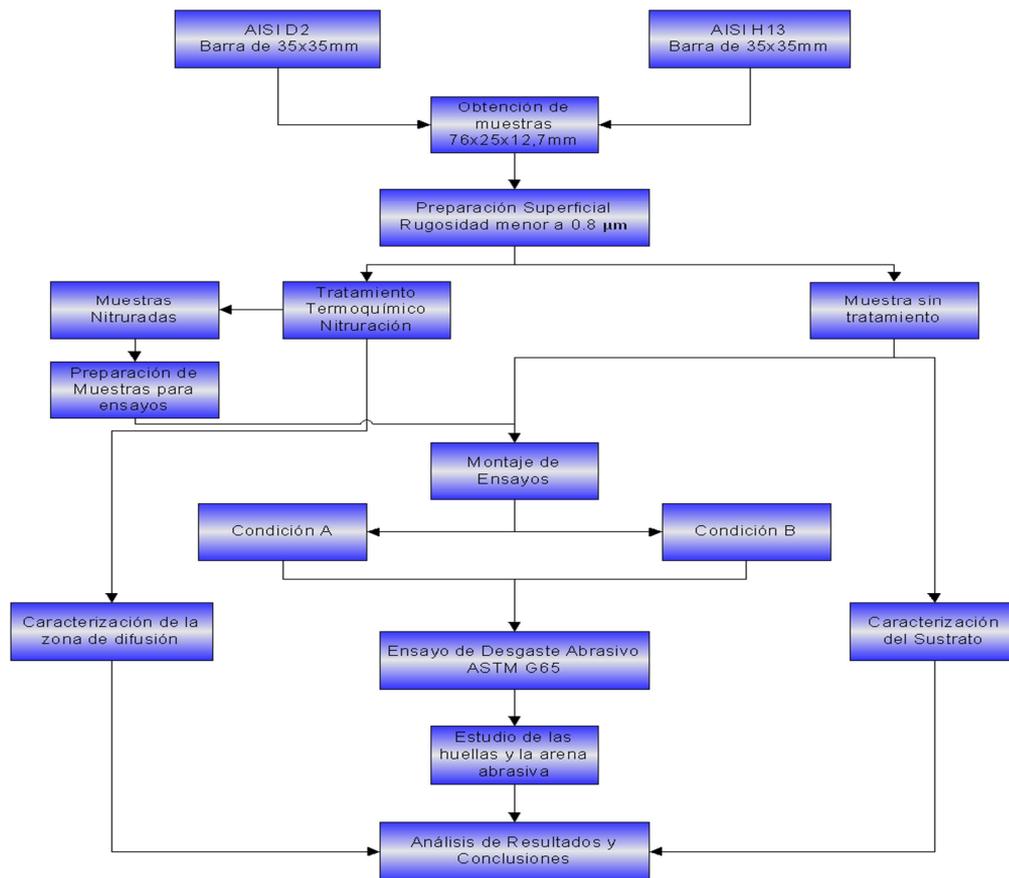


Fig. 9 Diagrama de flujo del Procedimiento Experimental

## 2.2 Elaboración de las muestras para ensayar

Para este trabajo de investigación se utilizaron los aceros para herramientas AISI D2 (para trabajo en frío) y AISI H13 (para trabajo en caliente) los cuales fueron adquiridos en la empresa FERRUM C.A., y cuyas composiciones nominales en % peso se presentan a continuación (ver tablas 4 y 5).

**Tabla 4. Acero para herramientas AISI D2**

% C	% Si	% Mn	% Cr	% Mo	% V
1.55	0.30	0.30	11.5	0.70	1.00

**Tabla 5. Acero para herramientas AISI H13**

% C	% Si	% Mn	% Cr	% V
0.39	1.00	0.40	5.10	1.00

### 2.2.1 Mecanizado y preparación de las muestras

Las probetas fueron mecanizadas hasta obtener las siguientes dimensiones 76 mm x 25 mm x 12.7 mm mediante el uso de un torno y una fresadora. Estas dimensiones son las requeridas para realizar los ensayos de abrasión según la designación ASTM G 65-81, con estas dimensiones se obtuvieron 12 muestras de AISI D2 y 12 muestras de AISI H13.

Para realizar los ensayos de abrasión la rugosidad máxima permitida es de 0.8  $\mu\text{m}$  y esta exigencia se logró mediante la realización de una serie de desbastes con papel de lija a base de carburo de silicio y suspensión de alúmina de 0.3  $\mu\text{m}$ . El equipo utilizado fue una máquina para desbaste marca BEUHLER MetaServ 2000, (ver figura 10).

Una vez garantizada las condiciones superficiales, se enviaron a la compañía FERRUM C.A. un grupo de muestras de cada uno de los aceros a estudiar con el fin de realizar el proceso de nitruración en baño de sales.



**Fig. 10** Equipo para desbaste Marca BEUHLER

Posteriormente, se realizó un corte transversal de las muestras del acero AISI D2 y del AISI H13, respectivamente, las cuales fueron embutidas en una base de resina transóptica con una máquina para embutir marca BEUHLER modelo Simplimet 2 (ver figura 11). Una vez obtenido el montaje se realizó la preparación metalográfica a ambas muestras, con el objetivo de medir el tamaño de la capa de difusión producto de la nitruración. Los equipos utilizados para este procedimiento fueron el microscopio óptico marca Olympus modelo PMG3 y el sistema de análisis de imágenes Leco IA-3001(ver figuras 13 y 15).

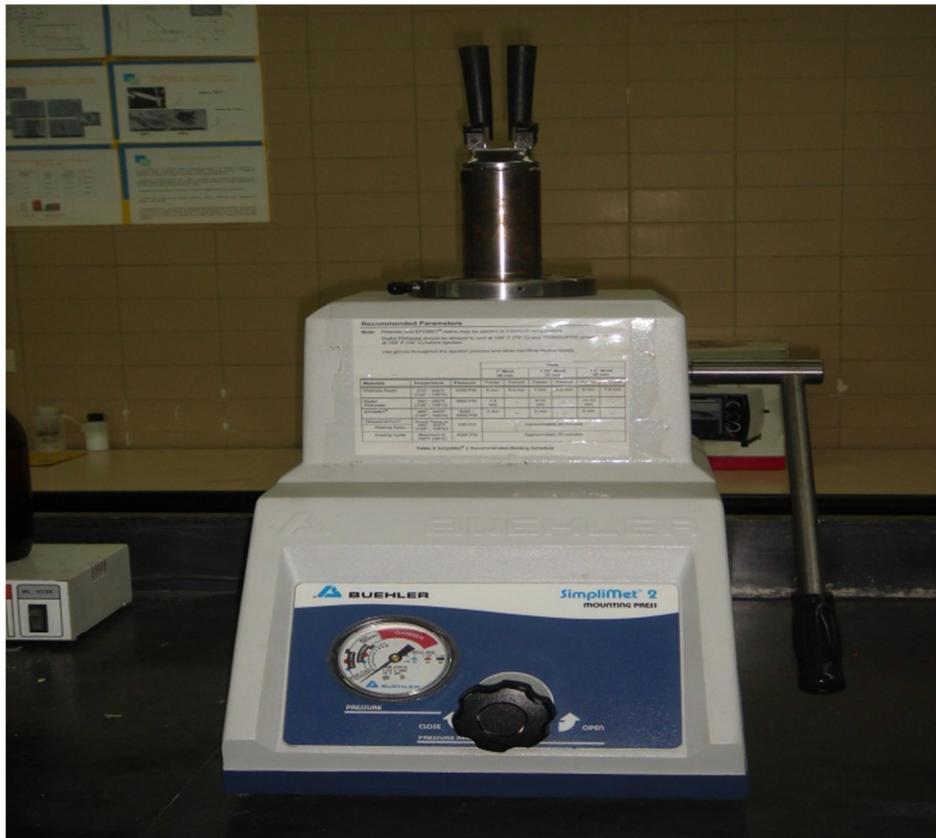
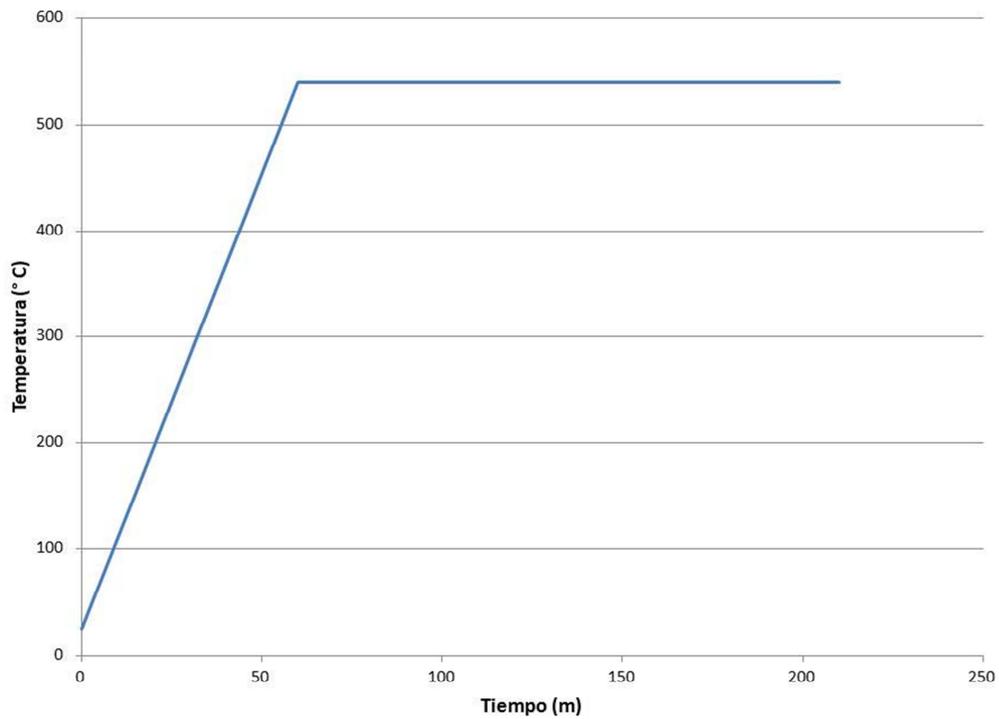


Fig. 11 Equipo para Embutir BEUHLER Simplimet 2

### 2.2.2 Tratamiento superficial

La nitruración en baño de sales de las 9 muestras de AISI D2 y 9 muestras de AISI H13 se realizó en la empresa FERRUM C.A. de Venezuela, empleando las condiciones de temperatura y de tiempo siguientes: una (01) hora de precalentamiento, y dos horas y media (2 ½) en el baño de nitruración a 540 °C (ver figura 12). No se obtuvo mayor información sobre las condiciones del proceso por ser realizado industrialmente.



**Fig. 12 Esquema de Tratamiento Térmico Realizado en función del Tiempo de Exposición (Nitruración en baño de sales)**

Seguidamente, las muestras cortadas y embutidas fueron la preparación metalográfica a través de una secuencia de desbaste suministrada por Struers <sup>[6]</sup> que consistió en:

**Tabla 6. Secuencia para Desbaste recomendada por Struers <sup>[6]</sup>.**

Secuencia de desbaste		
Superficie	SiC-Paper #220	MD-Plan
Abrasivo		DP-Susp. P 9 μ
Lubricante	Agua	DP-Blue
Velocidad (RPM)	300	150
Fuerza (N)	210	240
Tiempo (min)	2	7

**Tabla 7 Secuencia para Pulido Desbaste recomendada por Struers [6].**

<b>Secuencia de Pulido</b>		
Superficie	MD-Dac	MD-Chem
Abrasivo	DP-Susp. P 3 $\mu\text{m}$	OP-S, 0.04 $\mu\text{m}$
Lubricante	DP-Blue	
Velocidad (RPM)	150	150
Fuerza (N)	240	150
Tiempo (min)	5	2

Luego se realizó un ataque químico a la superficie con nital al 3% con el objetivo de revelar las características microestructurales de los aceros estudiados. El estudio metalográfico de la superficie se realizó mediante el uso de un microscopio óptico marca Olympus modelo PMG3 (ver figura 13).



**Fig. 13 Microscopio Óptico Olympus PMG3**

### 2.2.3 Medición de la rugosidad

Para obtener el perfil de rugosidad de los aceros estudiados con y sin nitruración en todas sus condiciones se utilizó el perfilómetro óptico, marca ZYGO, modelo New View 200 (ver figura 14). El principio de este equipo se basa en la interferometría óptica, la cual permite medir la rugosidad promedia (Ra).



Fig. 14 Perfilómetro Óptico marca Zygo New View 200

### 2.2.4 Medición de la dureza

La medición de la dureza se realizó empleando un microdurómetro marca LECO AI3001 con platina motorizada y un indentador Vickers. (Ver figura 15)

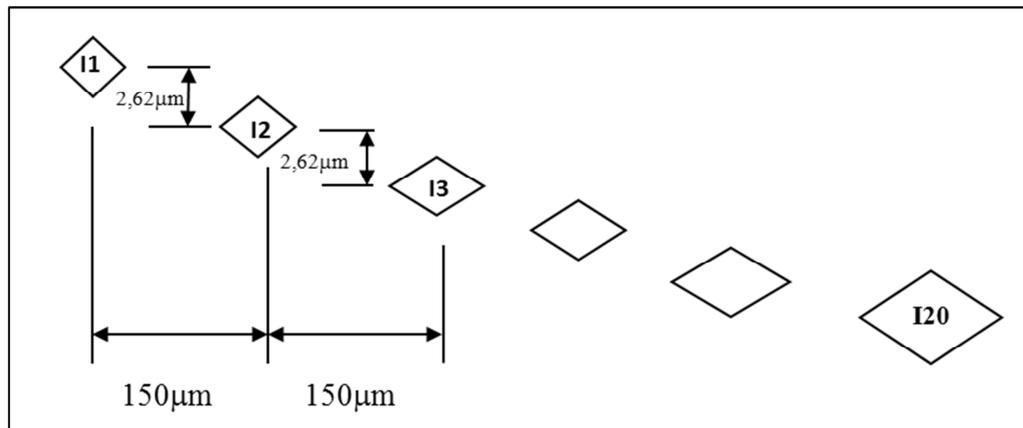


**Fig. 15 Microdurómetro LECO AI3001**

#### **2.2.4.1 Medición de la dureza de la sección transversal**

Se realizaron una serie de indentaciones con el microdurómetro marca LECO AI3001 para obtener la dureza superficial en la muestra de AISI D2 y AISI H13, respectivamente, con el fin de conocer la variación de la dureza superficial que se obtuvo mediante la nitruración en baño de sales.

También, se llevó a cabo la medición de la dureza en la sección transversal de las muestras de los aceros AISI H13 y AISI D2 que han sido nitruradas, a las cuales se le realizó un perfil de dureza siguiendo un patrón diagonal descendente, con el fin de cubrir toda la zona de difusión, tal como se indica en la figura 16. Las condiciones empleadas para realizar las mediciones fueron las siguientes: una carga de 50 gr y un tiempo de 15 segundos para cada aplicación de carga, con el objetivo de evaluar y determinar el espesor de la capa de difusión y la capa blanca.



**Fig. 16** Esquema de mediciones de durezas realizadas en secciones transversales del acero para herramientas AISI D2 y AISI H13 [12]

Una vez realizado el procedimiento antes mencionado y obtenidos los perfiles de dureza de cada acero estudiado, se procedió a calcular el espesor de la capa blanca contenida en la capa nitrurada basándose en el estudio de M. Hernández que permite relacionar el perfil de dureza *vs.* Profundidad <sup>[37]</sup>.

### 2.2.5 Eliminación de la capa blanca

Una vez conocido el espesor de la capa blanca, se procede a quitar esta capa manualmente empleando el equipo para desbaste con papel de lija a base de carburo de silicio y suspensión de alúmina de 0.3 micrómetros, asegurando que la rugosidad de la muestra no variara, hasta llegar a la dimensión deseada, controlándola con la ayuda de un tornillo micrométrico.

## 2.3 Caracterización Tribológica

### 2.3.1 Ensayo de Abrasión

Los ensayos de desgaste abrasivo se realizaron con el equipo marca FALEX, el cual fue construido con las indicaciones y restricciones referenciadas en la norma ASTM G 65-81<sup>[13]</sup>. Con este equipo se reproduce el ensayo con la configuración

básica de muestra, rueda de goma y agente extraño, que para nuestro caso es la arena de sílice 50-70, la cual posee las características específicas y necesarias para llevar a cabo los ensayos.

### 2.3.1.1 Descripción del equipo

La máquina de ensayos de desgaste abrasivo consta de una rueda de caucho de 228,6 mm de diámetro, cuya composición y dureza están estandarizadas, acoplada a un árbol que gira a velocidad constante. Éste es conducido por un motor eléctrico DC a través de un sistema reductor de engranajes. La disposición de la rueda de caucho permite que el caudal de abrasivo, proveniente de un recipiente ubicado en la parte superior de la máquina, caiga tangencialmente a la misma y en la dirección de giro. El flujo másico de abrasivo está controlado por el área transversal de la tobera de salida, creando una cortina uniforme entre la rueda y el espécimen, este último acoplado a la máquina mediante un porta probetas. A través de un sistema de palancas, un número determinado de pesas aplican la fuerza normal entre el espécimen y la rueda de caucho, carga que es soportada por las partículas abrasivas. Un esquema ilustrativo de la máquina de abrasión puede observarse en la figura 17.

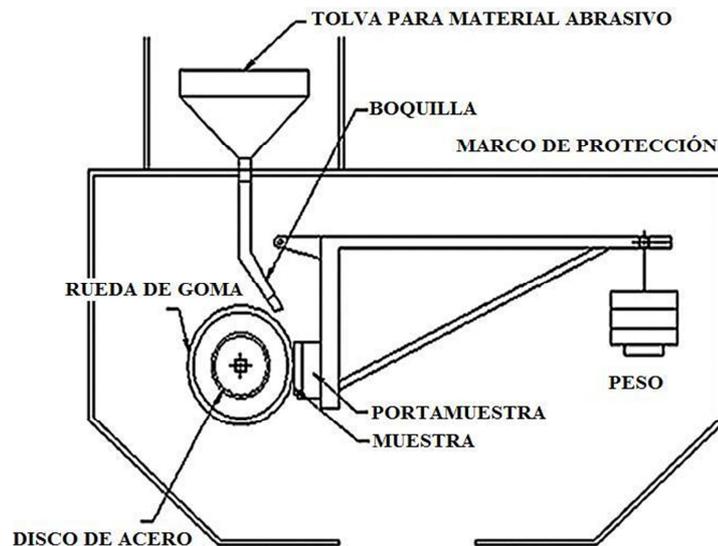


Fig. 17 Esquema de la máquina para realizar ensayos de abrasión

### 2.3.1.2 Condiciones para los ensayos

Las condiciones en las que se realizaron los ensayos de desgaste fueron las que se muestran en las tablas siguientes:

**Tabla 8 Condiciones para ensayos del acero para herramientas AISI D2**

<b>Muestra: AISI D2</b>			
Condición Superficial	Carga (N)	Distancia (m)	Tiempo (seg)
Sustrato	65	1436	600
Nitrurada S/ Capa Blanca	65	1436	600
Nitrurada C/ ½ Capa Blanca	65	1436	600
Nitrurada C/ Capa Blanca	65	1436	600
Sustrato	130	1436	600
Nitrurada S/ Capa Blanca	130	1436	600
Nitrurada C/ ½ Capa Blanca	130	1436	600
Nitrurada C/ Capa Blanca	130	1436	600

**Tabla 9 Condiciones para ensayos del acero para herramientas AISI H13**

<b>Muestra: AISI H13</b>			
Condición Superficial	Carga (N)	Distancia (m)	Tiempo (seg)
Sustrato	65	1436	600
Nitrurada S/ Capa Blanca	65	1436	600
Nitrurada C/ ½ Capa Blanca	65	1436	600
Nitrurada C/ Capa Blanca	65	1436	600
Sustrato	130	1436	600
Nitrurada S/ Capa Blanca	130	1436	600
Nitrurada C/ ½ Capa Blanca	130	1436	600
Nitrurada C/ Capa Blanca	130	1436	600

### 2.3.1.3 Procedimiento según la Norma ASTM G 65-81

- Limpiar las probetas.
- Pesar el espécimen.
- Colocar el espécimen en el porta objeto y agregar la carga respectiva.

- Fijar el temporizador con el valor correspondiente al número prescrito de rpm.
- Iniciar el flujo de arena (300-400 gr/min) y no iniciar la rotación hasta que se haya logrado un flujo uniforme de arena. El flujo de arena deberá ser medido antes y después de la prueba a menos que se haya establecido un flujo consistente.
- Iniciar la rotación de la rueda e inmediatamente bajar la palanca cuidadosamente para que la probeta haga contacto con la rueda. Cuando se alcancen las rpm requeridas, detener el flujo de arena y la rueda.
- Sacar la probeta y pesarla nuevamente.
- Comparar la huella obtenida con las figuras de huellas uniformes y no uniformes dadas en la norma.

#### **2.3.1.4 Cálculos y reporte de datos**

El registro de los resultados se llevó por pérdida de masa medida antes y después de cada ensayo. Los resultados obtenidos en los ensayos serán calculados y reportados por pérdida volumétrica, en  $\text{cm}^3$ . Dicha conversión se va a realizar mediante la siguiente ecuación.

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Dónde:

$V$  = Volumen Perdido en  $\text{cm}^3$ .

$\rho$  = Densidad del material.

$m$  = Masa perdida durante el ensayo.

Se emplearon tablas de análisis, gráficos de barras y fotomicrografías.

## **2.4 Análisis de la Huella de Desgaste y de la Arena Abrasiva**

### **2.4.1 Caracterización de la huella desgastada**

Una vez terminados los ensayos se realizó la selección de un grupo representativo de muestras a las cuales se les realizó la medición del tamaño de la huella generada por el ensayo, este procedimiento se efectuó con el equipo de análisis de imágenes.

Este grupo de muestras que está constituido por cada una de las condiciones estudiadas se utilizó para realizar una evaluación a través de la técnica de MEB, esta técnica sirve para identificar los mecanismos de desgaste presentes en las muestras ensayadas.

## CAPITULO III

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

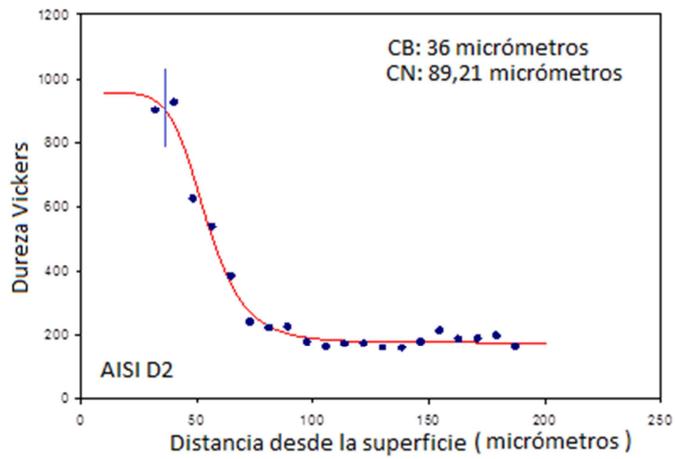
#### 3.1 Caracterización del material nitrurado

##### 3.1.1 Perfil de dureza

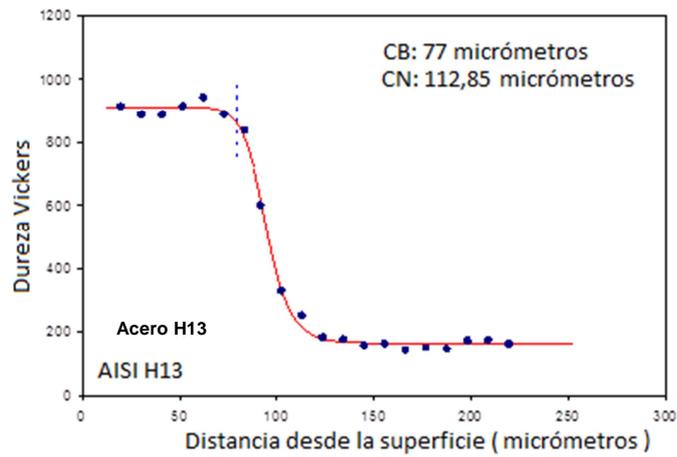
Las Figuras 18 y 19 presentan los resultados de los ensayos de dureza Vickers realizados a lo largo del espesor de la capa nitrurada del acero AISI D2 y AISI H13, respectivamente. Se observa, en ambos casos, que el valor de la dureza disminuye en la medida que se desplaza desde la superficie hasta el sustrato en cada probeta ensayada hasta lograr estabilizarse a un valor promedio nominal correspondiente a la dureza del sustrato. Este patrón de comportamiento era de esperarse debido a que durante el proceso de nitruración la concentración de nitrógeno varía desde una concentración alta en la superficie de la muestra hasta un valor que corresponde a la concentración inicial del acero. En la Tabla 10 se muestran valores promedios de dureza obtenidos. Se evidencia que el valor promedio de la dureza de la capa blanca generada en el proceso de nitruración está por encima del valor promedio correspondiente a la dureza de la zona de difusión y, por supuesto, a la del sustrato. Cabe destacar que este comportamiento se debe al hecho que en la capa blanca se forma un compuesto intermetálico a base de nitruro de hierro  $Fe_4N$ , cuya dureza es 4 o 5 veces más elevada que la del sustrato. Según los datos obtenidos en el perfil de dureza la capa blanca tiene un espesor de  $36\mu m$  para el acero AISI D2 y  $77\mu m$  para el acero AISI H13 (ver Figuras 18 y 19). Estos espesores fueron estimados a través del modelo presentado por Hernández *et al.* <sup>[37]</sup> el cual relaciona la segunda Ley de Fick con el perfil de dureza del material nitrurado, permitiendo estimar el valor de la profundidad de la capa blanca.

**Tabla 10 Comparación de las durezas promedio obtenidas**

	<b>AISI D2</b>	<b>AISI H13</b>
CONDICIÓN	DUREZA (HV <sub>0,5</sub> )	DUREZA (HV <sub>0,5</sub> )
Capa Blanca	962	916
Zona de difusión	448	394
Sustrato	184	166



**Fig. 18 Perfil de dureza de las muestras del acero AISI D2 tratadas termoquímicamente.**



**Fig. 19 Perfil de dureza de las muestras del acero AISI H13 tratadas termoquímicamente.**

Como se observa en las Tablas 11 y 12, la dureza del sustrato en la condición de como recibido es superior a la dureza promedio en el sustrato luego de realizar la modificación superficial. Este comportamiento se le atribuye al hecho de que en la zona donde no existe difusión de nitrógeno se genera crecimiento de grano, contribuyendo así a la disminución de la dureza promedio en esa zona. En cuanto a la dureza determinada en la superficie, se puede observar que su valor es aproximadamente 4 veces mayor que la dureza inicial, tal como se ha mencionado anteriormente.

**Tabla 11 Dureza Promedio de AISI D2 en diferentes condiciones**

<b>COMPARACION DE DUREZA HV<sub>0,05</sub> EN EL AISI D2</b>			
CONDICIÓN	DUREZA	DESV. STD.	% DESV. STD.
Sustrato sin modificación superficial	266	6	2
Sustrato con modificación superficial	164	14	9
Superficie con modificación superficial	962	33	3

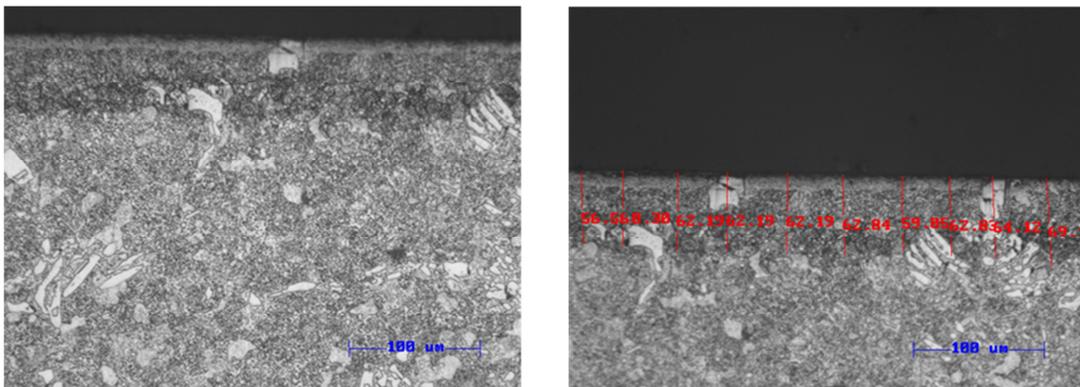
**Tabla 12 Dureza Promedio de AISI H13 en diferentes condiciones**

<b>COMPARACION DE DUREZA HV<sub>0,05</sub> EN EL AISI H13</b>			
CONDICIÓN	DUREZA	DESV. STD.	% DESV. STD.
Sustrato sin modificación superficial	229	8	3
Sustrato con modificación superficial	142	17	12
Superficie con modificación superficial	916	18	2

Ávila *et al.*<sup>[38]</sup> realizó la modificación superficial de un acero AISI 4340 mediante el uso de distintos tratamientos térmicos con el objetivo de mejorar su desempeño en condiciones de desgaste. La máxima dureza de 560 HV<sub>0,1</sub> fue encontrada en la superficie empleando el tratamiento térmico de Martempering y revenido a 205 °C, seguido por un enfriamiento en el horno. Este valor de dureza es un 44,5% menor que el valor máximo obtenido en este trabajo.

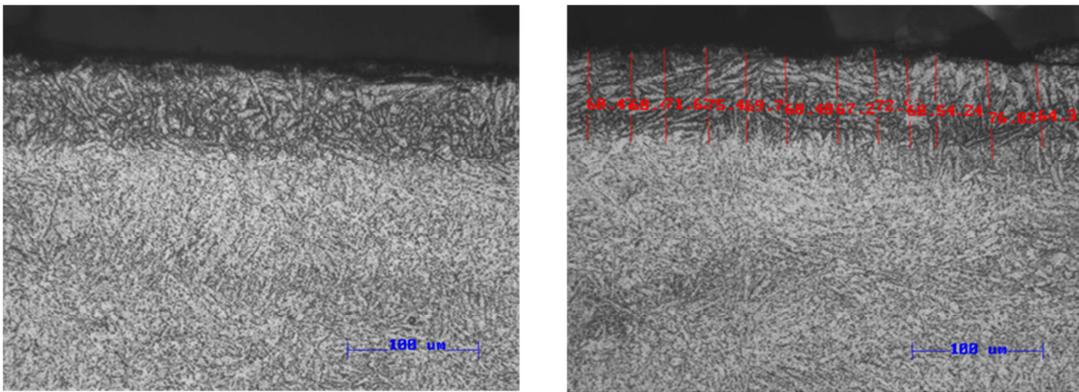
### **3.1.2 Estudio metalográfico de la capa nitrurada**

Se procedió a realizar el corte de la sección transversal de las muestras nitruradas para luego realizar la preparación metalográfica. El estudio metalográfico de las muestras preparadas se realizó mediante el microscopio óptico acoplado con un analizador de imágenes, que permitió la medición del espesor de la capa nitrurada para cada uno de los aceros estudiados, tal como se muestra en las Figuras 20 y 21. Estas mediciones indicaron que la profundidad de la capa nitrurada en el acero AISI D2 es de 89,21  $\mu\text{m}$ , de este espesor 36  $\mu\text{m}$  corresponden a la capa blanca según el perfil de dureza, es decir un 40,35% del espesor corresponde a la capa blanca y un 59,65% a la zona de difusión en este acero. En el caso del acero AISI H13, se encontró que la profundidad de la capa nitrurada es de 112,85  $\mu\text{m}$  de los cuales 77  $\mu\text{m}$  corresponde al espesor de la capa blanca alcanzando así una formación del 68,23% del total obtenido y dejando con 31,77% a la zona de difusión. Estos resultados evidencian que el acero AISI H13 obtuvo un mayor tamaño de la capa nitrurada que el acero AISI D2, lo que permite presumir que el espesor de la capa nitrurada disminuye con el aumento de los elementos aleantes dentro del acero, debido a que se forman nitruros que generan un efecto retardador en la difusión del nitrógeno dentro de la matriz. Resultados similares fueron encontrados en el trabajo reportado en la literatura <sup>[39]</sup>.



**Fig. 20** Micrografías obtenidas por MO del acero de herramienta D2 con tratamiento de nitruración en baño de sales, correspondiente a la sección transversal, ataque químico Nital 3 %.

En la Figura 20 se presenta la micrografía de la sección transversal perteneciente a la muestra de acero AISI D2 con tratamiento de nitruración en baño de sales. Se observa claramente la existencia de las zonas características de este tratamiento, donde se tiene la capa blanca seguida de una zona de difusión y por último, el sustrato. La metalografía revela lo que puede ser la formación de los nitruros ( $\text{FeN}$ ,  $\text{Fe}_4\text{N}$ ) y carbonitruros ( $\text{Fe}_3(\text{C}, \text{N})$ ) dentro de la matriz ferrítica y en especial, precipitados de carburo de cromo, por la elevada cantidad de este elemento dentro de la composición de este acero. Adicionalmente, se puede observar que la capa blanca tiene una morfología acicular.



**Fig. 21** Micrografías obtenidas por MO del acero de herramienta H13 con tratamiento de nitruración en baño de sales, correspondiente a la sección transversal, ataque químico Nital 3%.

La Figura 21 corresponde a la micrografía de la sección transversal perteneciente a una muestra de acero AISI H13 con tratamiento de nitruración en baño de sales. Se observa igualmente la existencia de las zonas características de este tipo de tratamiento. A diferencia de la microestructura observada en el caso del acero AISI D2, en este acero se nota que la morfología de los granos tiende a ser columnares o alargados, formando lo que comúnmente se conoce como agujas de nitruros. La orientación de dichos granos dentro de la microestructura tiende a ser paralela a la superficie nitrurada lo que, posiblemente, puede generar el desconchamiento de la

capa nitrurada. De igual forma, se observa la presencia de nitruros y carbonitruros dentro de la matriz ferrítica <sup>[40]</sup>.

### 3.1.3 Medición de la rugosidad superficial.

Con la ayuda de un interferómetro óptico se realizó un barrido de la superficie para obtener el valor promedio de rugosidad presente en las probetas antes de cada ensayo. Según la norma ASTM G65<sup>[13]</sup> queda establecido que la rugosidad en la superficie antes del ensayo debe ser menor o igual a 0,8  $\mu\text{m}$ . Tal como se muestra en la Tabla 14, los valores obtenidos en la preparación superficial no exceden el valor de la rugosidad estipulado por la norma. En la Figuras 22 y 23 se presentan dos imágenes generadas por interferometría óptica en las cuales se refleja la topografía de la zona a ensayar.

**Tabla 13 Rugosidad Superficial de las muestras ensayadas.**

<b>AISI D2</b>			
CONDICIÓN	RA ( $\mu\text{M}$ )	DESV. STD.	% DESV. STD.
A	6,60E-02	2,33E-03	4
B	5,30E-02	1,56E-03	3
C	1,89E-01	9,97E-03	5
D	2,44E-01	7,27E-03	3
<b>AISI H13</b>			
CONDICIÓN	RA ( $\mu\text{M}$ )	DESV. STD.	% DESV. STD.
A	2,64E-01	4,54E-03	2
B	3,03E-01	8,47E-03	3
C	1,49E-01	5,76E-03	4
D	5,40E-02	1,64E-03	3

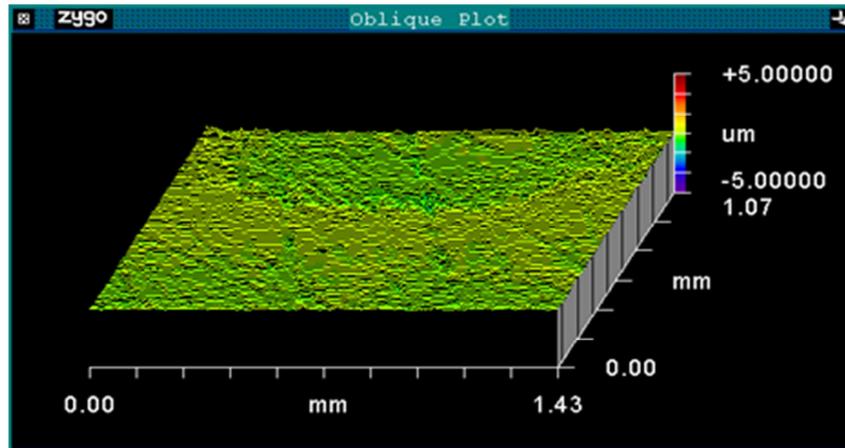


Fig. 22 Representación gráfica de la rugosidad superficial en la zona de ensayo del acero para herramienta AISI D2, obtenida por interferometría óptica.

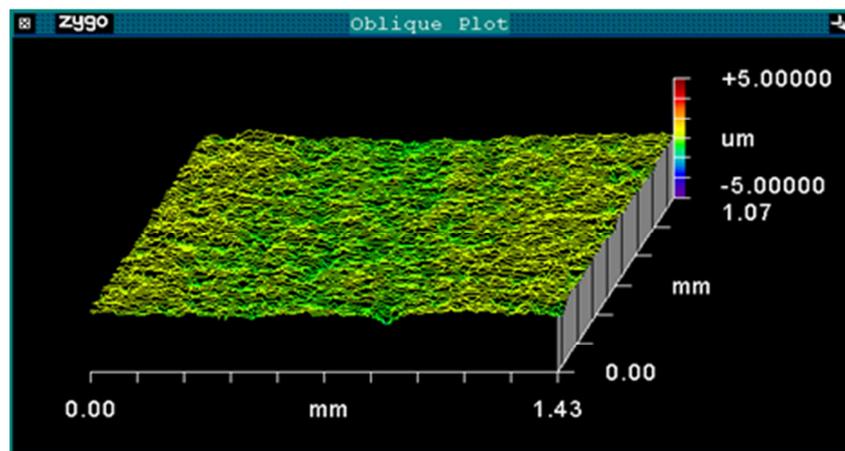


Fig. 23 Representación gráfica de la rugosidad superficial en la zona de ensayo del acero para herramienta AISI H13, obtenida por interferometría óptica.

### 3.2 Determinación de los mecanismos de desgaste presentes en cada sistema estudiado

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada sistema estudiado. La caracterización de los mecanismos de desgaste en cada una de las muestras, una vez realizados los ensayos de abrasión, y las medidas correspondientes a la pérdida de material por desgaste, se llevó a cabo empleando las técnicas de

microscopía óptica, análisis de imagen, microscopía electrónica e interferometría óptica, respectivamente.

Finalizadas las observaciones morfológicas de las huellas para cada condición estudiada se determinó lo siguiente:

La Figura 24 corresponde a la micrografía obtenida empleando la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) para una probeta de acero AISI D2 ensayada en la condición de como-recibido. Se observa la formación de canales o surcos a lo largo de la superficie de la probeta, que se deben a la penetración de las partículas abrasivas sobre la superficie de la muestra, generando a su vez un desplazamiento de material hacia los lados del canal durante el contacto. El paso de las partículas abrasivas produce la deformación plástica y el corte del material <sup>[35]</sup>.

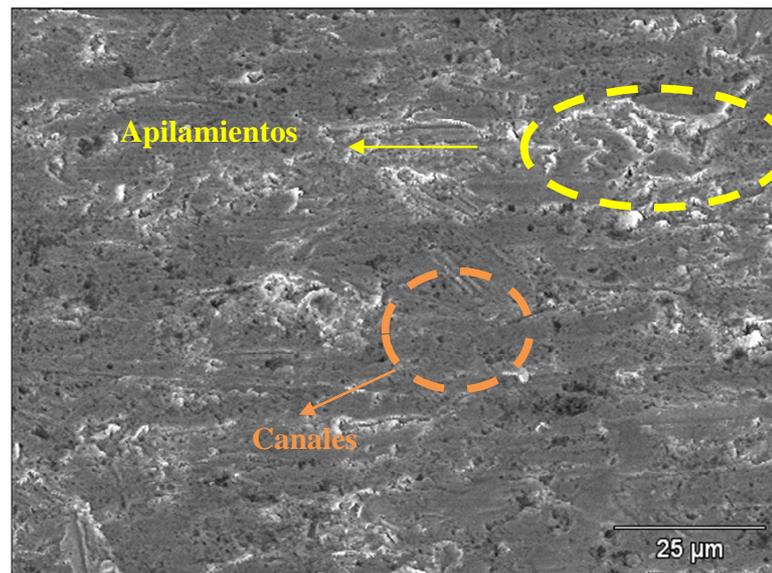
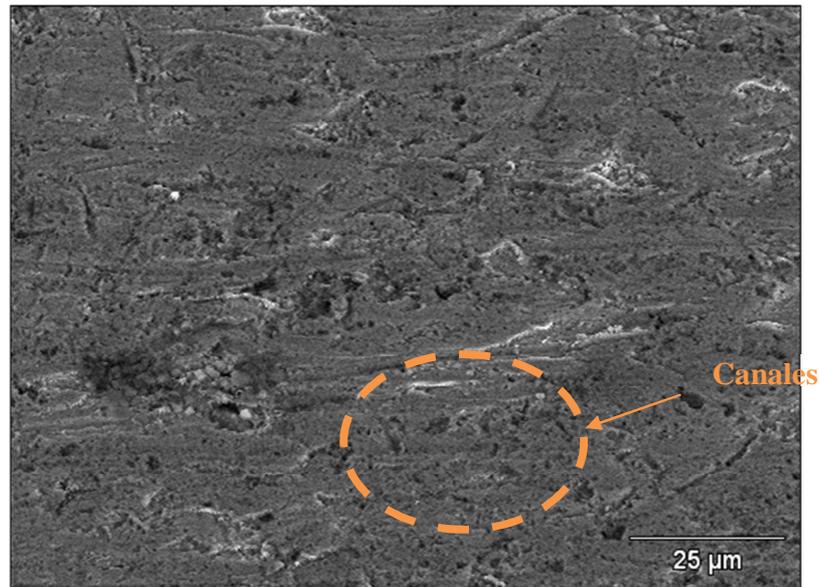


Fig. 24 Micrografía obtenida por MEB del acero AISI D2 (Carga de trabajo 130 N)

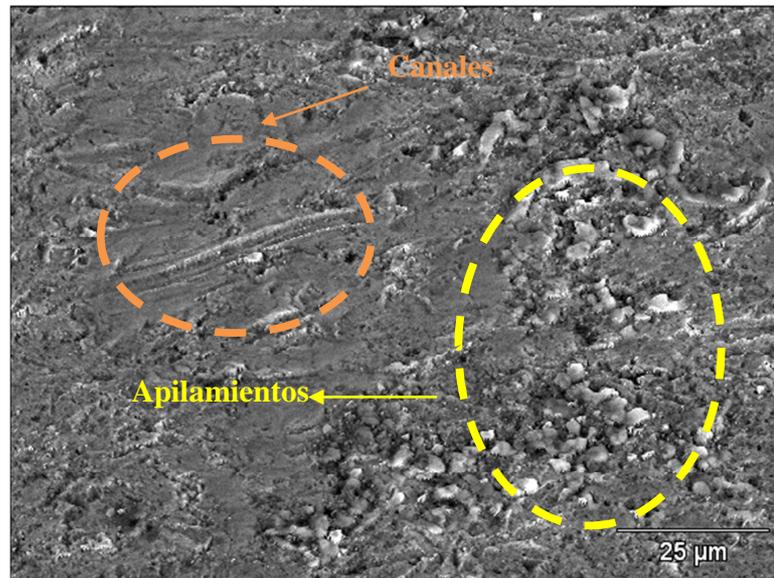


**Fig. 25** Micrografía obtenida por MEB del acero AISI H13 (Carga de trabajo 130 N).

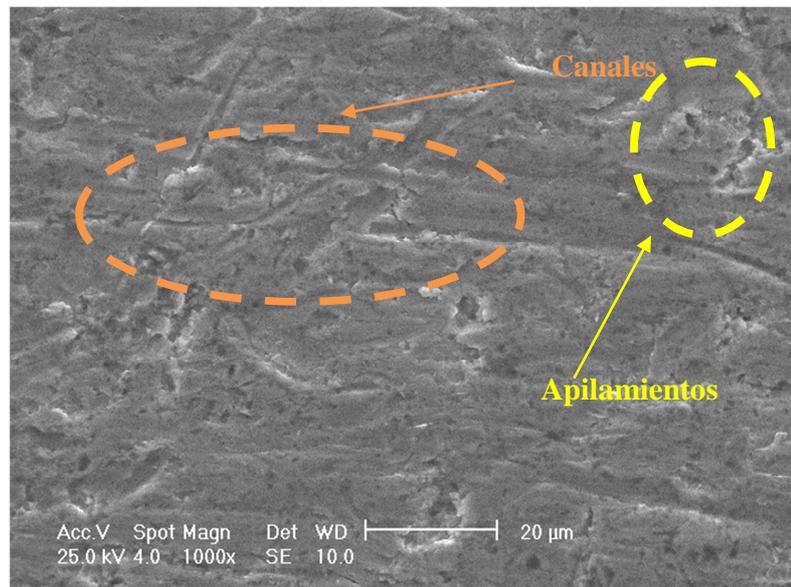
La Figura 25 corresponde a la imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido realizada a una probeta de acero AISI H13. Dicha probeta responde a la condición de como-recibido y una carga de trabajo de 130 N. En la micrografía se observa la existencia de canales o surcos a lo largo de la superficie de la probeta los cuales son mucho más pronunciados que las observadas en el acero AISI D2, para las mismas condiciones de ensayo. En este caso, si bien el mecanismo de abrasión es similar, adicionalmente se puede considerar la existencia de un fenómeno de microfátiga en este acero, debido a la cantidad de surcos producidos en dirección del paso de las partículas abrasivas expuestas al esfuerzo compresivo<sup>[41]</sup>. También, se observa la deformación plástica del material, el cual sufre un endurecimiento por deformación, perdiendo de esta forma su ductilidad, lo cual conlleva a su fractura.

Las Figuras 26 y 27 corresponden a la condición de sustrato con tratamiento termoquímico sin remoción de capa blanca. En ambas se observa la presencia de canales y apilamientos de material, producto del desgaste ocasionado por las partículas abrasivas empleadas durante el ensayo. En la figura 26 se nota una amplia

zona de desprendimiento de material debido a la existencia de la capa de nitruros de hierro, las cuales son muy frágiles, permitiendo así su desprendimiento debido al paso de las partículas abrasivas.



**Fig. 26** Micrografía obtenida por MEB del acero para herramientas AISI D2 (Carga de trabajo 130 N)



**Fig. 27** Micrografía obtenida por MEB del acero para herramientas AISI H13 (Carga de trabajo 130 N).

En todas las micrografías la deformación observada presenta una topografía ondulada, en sentido transversal al movimiento de las partículas abrasivas, indicando que éstas no desgastaron al material solamente por un mecanismo de corte, sino por una combinación de abrasión por deformación plástica del material y abrasión cortante. Dicho comportamiento era de esperarse, ya que los aceros, independiente de sus contenidos de carbono y condiciones de tratamiento térmico, siempre presentan cierto grado de ductilidad <sup>[36]</sup>.

### **3.3 Cuantificación de la extensión del desgaste abrasivo generado para cada sistema estudiado**

#### **3.3.1 Caracterización tribológica**

Una vez mencionados los mecanismos de desgaste en cada sistema estudiado, a continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la aplicación del ensayo tribológico de los aceros bajo estudio.

##### **3.3.1.1 Ensayo de desgaste según la Norma ASTM G-65 realizado al acero AISI D2**

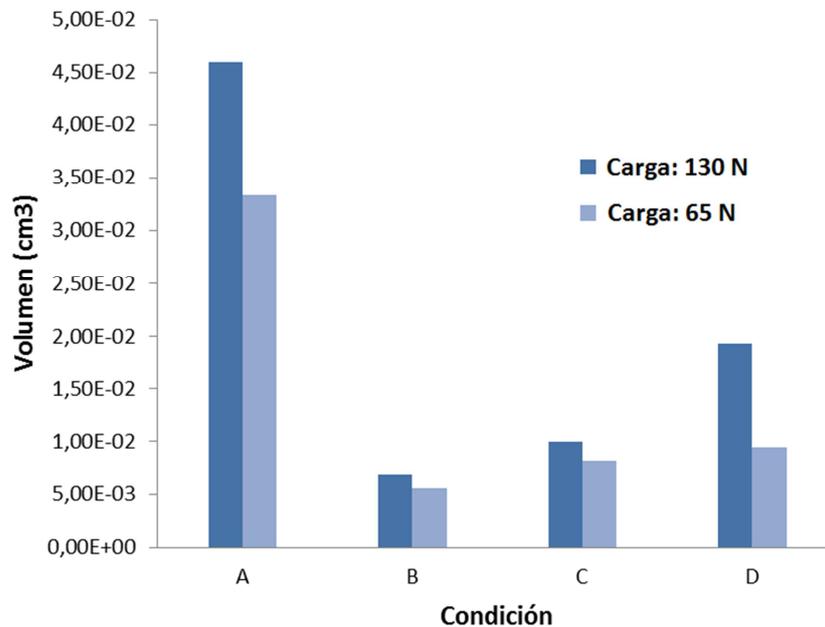
En la siguiente tabla están indicados los valores iniciales y finales determinados durante la ejecución de los ensayos propuestos en la presente investigación. Allí, se pueden observar cuales han sido las cargas usadas para el ensayo expresadas en Newton, la condición superficial de la muestra, el volumen correspondiente de la muestra antes del realizar el ensayo y después del mismo, así como la desviación estándar obtenida a partir de las mediciones realizadas.

**Tabla 14. Resultados obtenidos de los ensayos de abrasión realizados a la muestras de acero para herramientas AISI D2.**

Carga (N)	Condición	V <sub>0</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>f</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>L</sub> (cm <sup>3</sup> )	DESVEST	% DESVEST
130	A	2,35E+01	2,34E+01	4,60E-02	4,13E-04	1
130	B	2,32E+01	2,32E+01	6,80E-03	6,43E-05	1
130	C	2,34E+01	2,34E+01	1,00E-02	2,92E-04	3
130	D	2,32E+01	2,32E+01	1,94E-02	3,86E-04	2
65	A	2,34E+01	2,34E+01	3,34E-02	1,29E-03	4
65	B	2,35E+01	2,35E+01	5,57E-03	2,94E-04	5
65	C	2,32E+01	2,32E+01	8,19E-03	2,30E-04	3
65	D	2,31E+01	2,31E+01	9,44E-03	3,86E-04	4

#### Legenda de la Condición Superficial

- A: Sustrato sin tratamiento termoquímico
- B: Sustrato con tratamiento termoquímico y capa blanca
- C: Sustrato con tratamiento termoquímico y medio espesor de la capa blanca
- D: Sustrato con tratamiento termoquímico sin capa blanca



**Fig. 28 Volumen desgastado en las muestras de Acero para herramientas AISI D2**

Se puede observar en la figura anterior el comportamiento ante el desgaste abrasivo del acero para herramientas AISI D2, sometido a ensayo de desgaste de tres cuerpos bajo dos cargas distintas y cuatro condiciones superficiales. El ensayo muestra que la pérdida volumétrica en el sustrato sin tratamiento termoquímico (condición A) es mayor que en cualquiera de las otras condiciones superficiales. Este resultado indica que la dureza del sustrato en las muestras sin modificación superficial es menor que la correspondiente a las muestras modificadas superficialmente. Aún más, se observa que en el caso de las muestras modificadas superficialmente, la pérdida volumétrica debido al proceso abrasivo aumenta a medida que disminuye el espesor de la capa nitrurada.

### 3.3.1.2 Ensayo de desgaste según la Norma ASTM G-65 realizado al acero AISI H13

En la siguiente tabla están indicados los valores iniciales y finales generados durante la ejecución de los ensayos propuestos para esta investigación. Allí se puede observar las cargas usadas para el ensayo expresadas en Newton, la condición superficial, el volumen antes de realizar el ensayo y después del mismo, así como la desviación estándar del ensayo.

**Tabla 15. Resultados obtenidos de los ensayos de abrasión realizados a la muestras de acero para herramientas AISI H13.**

Carga (N)	Condición	V <sub>0</sub> (cm <sup>3</sup> )	V <sub>f</sub> (cm <sup>3</sup> )	VL (cm <sup>3</sup> )	DESVEST	% DESVEST
130	A	2,27E+01	2,26E+01	1,05E-01	2,34E-03	2
130	B	2,27E+01	2,26E+01	5,39E-02	2,42E-03	4
130	C	2,30E+01	2,30E+01	6,64E-02	1,84E-03	3
130	D	2,30E+01	2,29E+01	1,15E-01	1,11E-03	1
65	A	2,25E+01	2,25E+01	6,02E-02	1,18E-03	2
65	B	2,23E+01	2,22E+01	3,33E-02	1,26E-03	4
65	C	2,31E+01	2,30E+01	4,88E-02	1,27E-03	3
65	D	2,30E+01	2,30E+01	6,28E-02	3,44E-03	5

### Legenda de la Condición Superficial

- A: Sustrato sin tratamiento termoquímico
- B: Sustrato con tratamiento termoquímico y capa blanca
- C: Sustrato con tratamiento Termoquímico y medio espesor de la capa blanca
- D: Sustrato con tratamiento termoquímico sin capa blanca

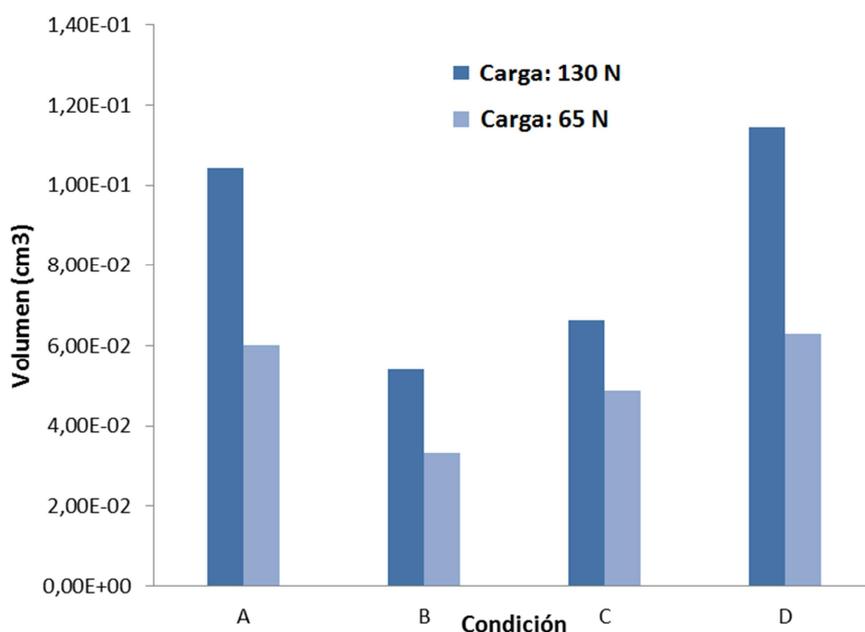


Fig. 29 Volumen desgastado en el Acero AISI H13

Se observa el mismo patrón de desgaste en los ensayos realizados al acero AISI H13 y en el AISI D2. La pérdida volumétrica o desgaste en el acero AISI H13 es mayor que en el AISI D2 en cualquiera de las condiciones estudiadas como consecuencia de la diferencia entre la dureza del acero para herramientas AISI H13 y la del AISI D2, siendo la primera menor. Es importante señalar que la pérdida volumétrica de la muestra con nitruración sin capa blanca (Condición “D”) del acero para herramientas AISI H13 es muy similar a la registrada en la muestra ensayada de la condición de como-recibida (Condición “A”). Este comportamiento se le puede atribuir a la dureza en la zona de ensayo, en el caso de la muestra en condición de

como-recibido su estado es recocido y la superficie sufre endurecimiento por deformación debido al maquinado realizado para obtener las dimensiones necesarias exigidas por la norma y la máquina de ensayos, lo que indica que la dureza superficial es mayor que la del resto del material, tal como se observa en la Tabla 12. En el caso de las muestras con nitruración sin capa blanca, el perfil de dureza muestra que la zona de difusión es muy pequeña y que su dureza es muy cercana a la del sustrato, también sufre endurecimiento por deformación, ya que las muestras son maquinadas para obtener la condición superficial, estas razones generan un comportamiento muy similar en la velocidad de desgaste como se muestra en la Figura 29.

En la investigación llevada a cabo por Ávila *et al.* se indica que el mejor comportamiento ante la abrasión no la presenta la de superficie con una mayor dureza, sino que la respuesta ante el desgaste abrasivo depende principalmente de la condición microestructural del material y el tamaño de los granos. Esta condición evidencia que la dureza no es el único factor a considerar en la selección de aceros de alta resistencia al desgaste, lo que abre la posibilidad de realizar otros tratamientos térmicos adicionales a las iniciales utilizados en esta investigación que conduzcan a un cambio microestructural favorable <sup>[38]</sup>.

### 3.3.1.3 Características de la huella desgastada

Las huellas de desgaste obtenidas en la mayoría de las condiciones presentan una zona que pueden diferenciarse claramente y se denominan “zona de socavadura” (ver figura 30).

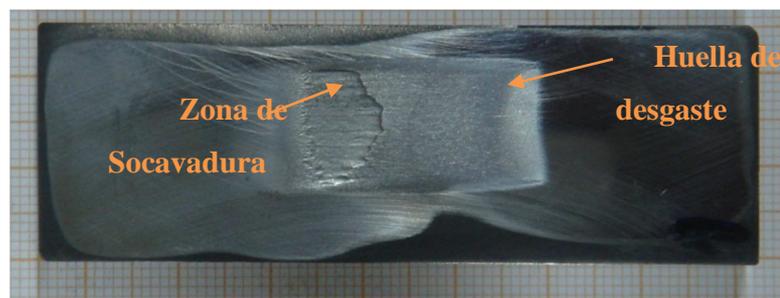


Fig. 30 Huella del desgaste abrasivo en una muestra de Acero para Herramientas AISI D2.

Por medio del analizador de imágenes, se pudo establecer el valor del área ocupada por la huella tanto en la zona de socavadura, como en la zona de abrasión. Estos resultados se muestran en la Tabla 16, en donde se destacan variables tales como: la condición de las probetas, la carga empleada durante el ensayo, la zona donde fue registrado el resultado y el valor del área respectivamente.

**Tabla 16. Características de la huella de abrasión.**

		Carga de 65 N		Carga de 130 N	
		D2	H13	D2	H13
Condición	Zona	área ( $\mu^2$ )			
Sustrato	Socavadura	0	0	0	0
	Huella	13126000	15087000	17378000	18326000
CCB	Socavadura	725700	6618600	2753800	7901800
	Huella	12090000	12166000	15721000	17870000
C½CB	Socavadura	3517200	8780500	4225300	9109700
	Huella	12325000	12912000	13674000	14743000
SCB	Socavadura	0	0	0	0
	Huella	12499000	13969000	14120000	17134000

La Figura 31 corresponde a una representación gráfica de los resultados obtenidos en la tabla anterior, donde se puede observar para la primera y última condición (sin tratamiento superficial y con tratamiento termoquímico sin capa blanca), que no presentaron zonas de socavadura. Además, el área alcanzada por las huellas de abrasión en las muestras que fueron ensayadas empleando una carga de 65 N es menor que el área alcanzada por las huellas de abrasión de las muestras que fueron ensayadas empleando una carga de 130 N, dicho comportamiento era

predecible debido a que la carga empleada en el ensayo es la causante de producir un aumento o disminución en el volumen de desgaste para una misma condición.

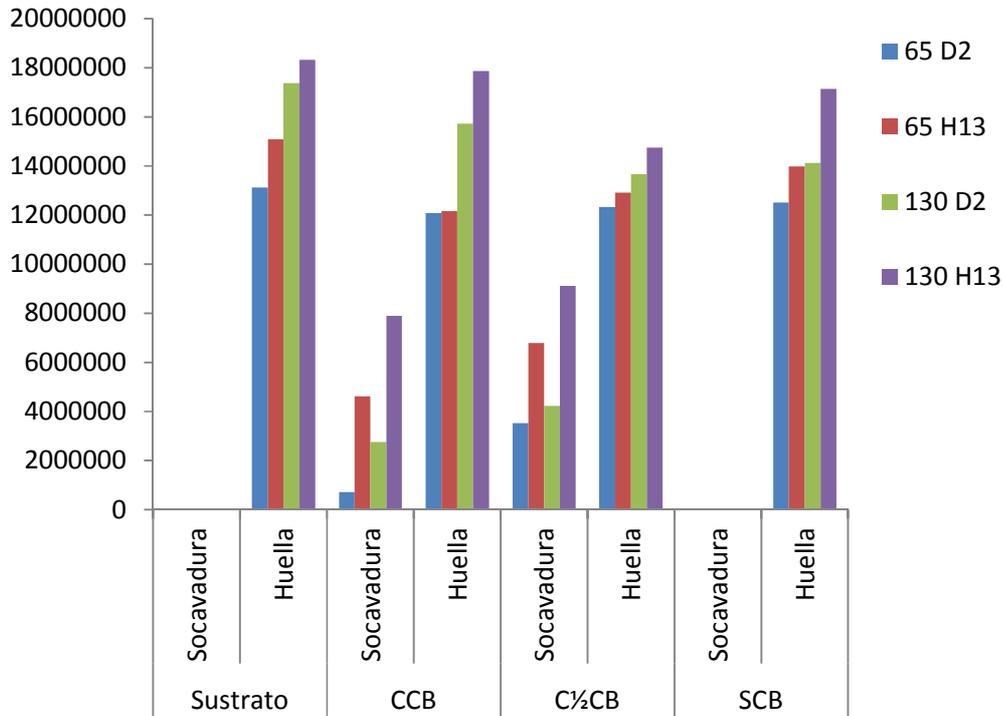


Fig. 31 Características de la huella de abrasión.

La segunda y tercera condición responde a las muestras con tratamiento termoquímico y con capa blanca. En la Figura 30 se puede observar la presencia de una zona de socavadura en la huella de desgaste. Si bien es cierto que la capa blanca, que se forma luego del proceso de nitruración aumenta la dureza superficial de los aceros, también es cierto que en dicha capa se forman compuestos frágiles que pueden generar su desprendimiento y que estas mismas partículas frágiles y duras se queden en el contacto, produciendo así un mayor desgaste y, por ende, la presencia de zonas de socavadura.

Adicionalmente, se observa que la zonas de socavadura registradas en el acero AISI H13 supera en área a las registradas en el AISI D2, resultado que permite inferir que el acero AISI D2 obtuvo mejor rendimiento durante el ensayo de abrasión que el acero AISI H13, corroborando lo mencionado en el sección anterior donde se describe que el acero AISI H13 registró mayor pérdida volumétrica.

Como se observó al inicio de este capítulo, el ensayo de abrasión demostró que las probetas sometidas a nitruración presentaron desprendimiento de la capa superficial, generando una zona denominada socavadura. Las posibles causas que pudieron afectar este comportamiento han sido explicadas en función de la microestructura obtenida en cada caso. Sin embargo, se sabe que cuando se obtiene una capa blanca con profundidades que excedan un espesor  $12,7 \mu\text{m}$ , la capa tiende a astillarse desde la superficie <sup>[1] [7]</sup>. Los resultados obtenidos en la investigación demuestran que la profundidad de la capa blanca en ambos aceros superaron dicho valor teórico, ya que durante el proceso de nitruración se produjeron espesores de  $36 \mu\text{m}$  para el acero AISI D2 y un espesor de  $77 \mu\text{m}$  para el acero AISI H13.

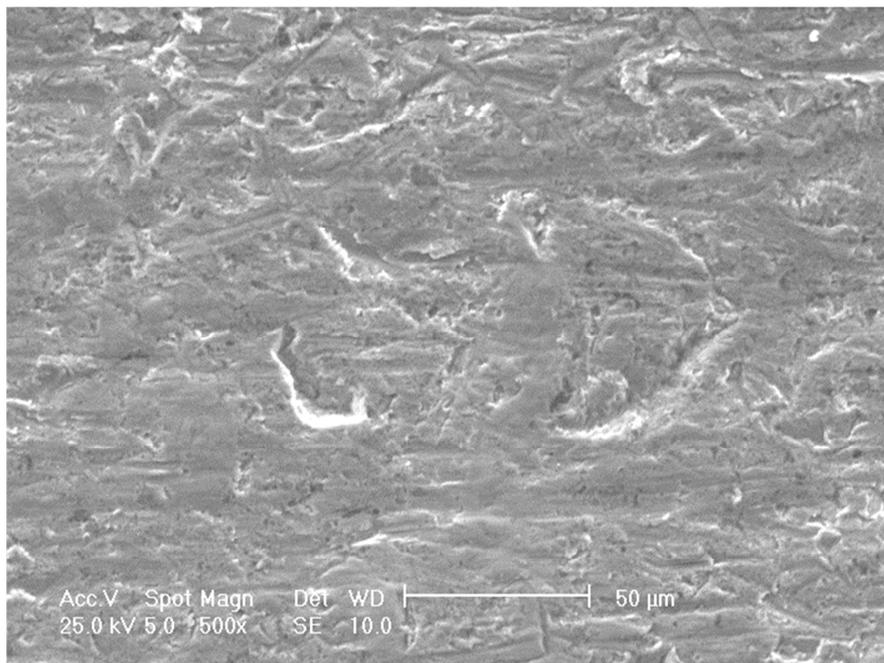
Estos resultados indican que el acero AISI H13 presentará un mayor desprendimiento de la capa blanca, hecho que se verificó por la magnitud del área ocupada por la zona de socavadura una vez concluido el ensayo de desgaste, dichos resultados permiten inferir que a un mayor espesor de la capa blanca en los aceros nitrurados mas predominante sería el mecanismo de desgaste abrasivo.

Ma *et al.* <sup>[42]</sup> realizaron el análisis del comportamiento ante el desgaste abrasivo del acero AISI D2 y demostraron que este acero mejora su comportamiento en la medida en que se aumenta la carga de ensayo, es decir, el daño generado en las muestras ensayadas con menos carga es superior al que se generó en las muestras ensayadas con mayor carga. Estos resultados son inesperados y totalmente contrarios a los obtenidos anteriormente por Stevenson y Hutchings <sup>[45]</sup> que indicaron que las pérdidas por desgaste son directamente proporcionales a la carga aplicada. Sin embargo, Haworth <sup>[44]</sup> afirma que esta relación de proporcionalidad pudiera ser mayor de lo esperada para cargas mucho mayores mientras que Avery <sup>[43]</sup> observó que la dureza del caucho de la rueda puede eventualmente influenciar la dependencia del

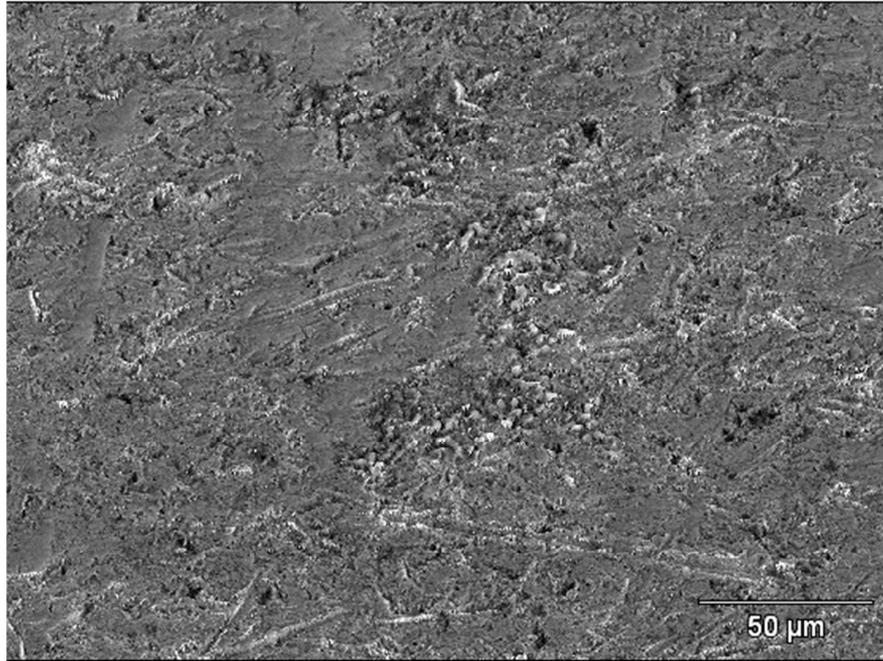
volumen desgastado con la carga, indicando que para una rueda más blanda el volumen desgastado del acero de herramienta es menor que para cargas mayores debido al aumento considerable de la superficie de contacto.

Resultados similares a los presentados por Ma *et al.* [42] han sido obtenidos en el presente trabajo, tal como se muestra en las Figuras 32 y 33 en donde se puede ver que el daño generado en la superficie de trabajo de las muestras ensayadas con 65 N es superior que al generado en las muestras ensayadas con 130 N, este comportamiento se muestra en el acero AISI D2.

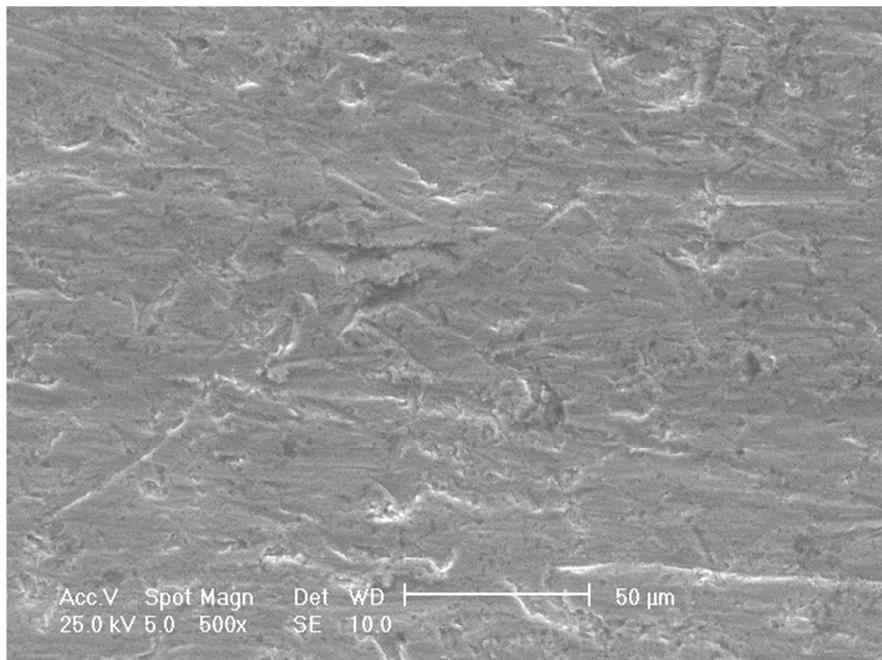
Igual comportamiento se obtuvo en el caso del acero AISI H13, tal como se puede notar en las micrografías presentadas en las Figuras 34 y 35, que han sido obtenidas mediante el estudio de MEB llevado a cabo en las superficies desgastadas después del ensayo de abrasión.



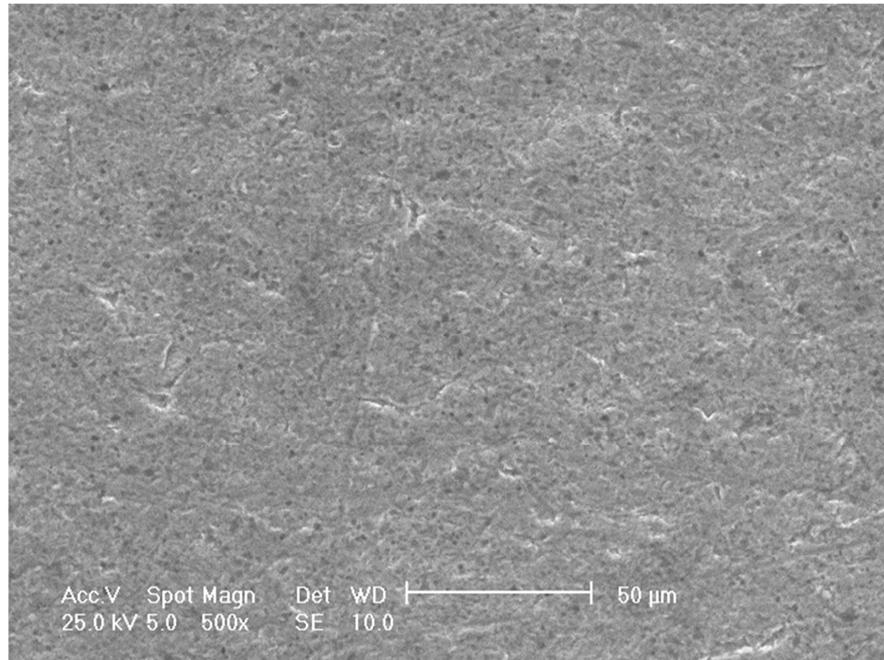
**Fig. 32** Imagen obtenida por MEB del Acero para herramienta AISI D2 ensayado con una carga de 65 N.



**Fig. 33** Imagen obtenida con MEB del Acero para herramienta AISI D2 ensayado con una carga de 130 N.



**Fig. 34** Imagen obtenida con MEB del Acero para herramientas AISI H13 ensayado con una carga de 65 N.



**Fig. 35 . Imagen obtenida con MEB del Acero para herramientas AISI H13 ensayado con una carga de 130 N.**

Se piensa que este comportamiento inesperado en este caso pudiera ser atribuido a dos posibles mecanismos: a.) cambios microestructurales a la superficie del acero de herramienta para cargas mayores o b.) Cambios morfológicos que sufre el abrasivo durante el ensayo. Sin embargo, el primer mecanismo ha sido descartado por Ma *et al.* <sup>[42]</sup>, quienes realizaron tanto ensayos mediante la difracción de rayos X, así como mediciones de dureza sobre las superficies de las muestras antes y después del ensayo de abrasión, indicando que el mecanismo de endurecimiento no es predominante como para explicar la disminución del volumen de desgaste a medida que la carga del ensayo aumenta.

En cuanto al segundo mecanismo, se consideró que puede ser la única explicación a este comportamiento inusual. Se sabe que la arena de SiO<sub>2</sub> tiene una dureza HRC 65, que es un poco mayor que la del acero AISI D2, que es igual a HRC 55. Su fragilidad o poca tenacidad hace que sea vulnerable a los altos esfuerzos

producidos al aumentar la carga, sufriendo entonces daños superficiales y agrietamiento, que lo hace menos capaz de penetrar la superficie del acero durante el ensayo, produciendo una superficie mucho más lisa y con menos cráteres.

A continuación, en la Tabla 17 se presenta un cuadro resumen de los resultados obtenidos durante el presente estudio, realizando una comparación de los valores correspondientes a los parámetros determinados, tales como la dureza, la pérdida volumétrica en cada condición y la profundidad de la capa nitrurada en cada uno de los aceros ensayados. Los resultados demuestran que la dureza en ambos aceros aumenta luego de la aplicación del tratamiento termoquímico, siendo un poco más acentuada en el acero AISI D2 que en el acero AISI H13.

**Tabla 17. Resumen de Valores.**

	<b>AISID2</b>		<b>AISIH13</b>	
Ra( $\mu\text{m}$ )	9,13E-02		1,06E-01	
Dureza (HV0,5) capa blanca	962 $\pm$ 3%		916 $\pm$ 3%	
Dureza (HV0,5) Zona de difusión	448 $\pm$ 38%		394 $\pm$ 46%	
Dureza (HV0,5) sustrato	184 $\pm$ 13%		164 $\pm$ 9%	
Carga de ensayo (N)	130	65	130	65
VL (cm <sup>3</sup> ) sustrato inicial	4,60E-02 $\pm$ 1%	3,34E-02 $\pm$ 4%	1,05E-01 $\pm$ 2%	6,02E-02 $\pm$ 2%
VL (cm <sup>3</sup> ) con capa blanca	6,80E-03 $\pm$ 1%	5,57E-03 $\pm$ 5%	5,39E-02 $\pm$ 4%	3,33E-02 $\pm$ 4%
VL (cm <sup>3</sup> ) con 1/2 capa blanca	1,00E-02 $\pm$ 3%	8,19E-03 $\pm$ 3%	6,64E-02 $\pm$ 3%	4,88E-02 $\pm$ 3%
VL (cm <sup>3</sup> ) sin capa blanca	1,94E-02 $\pm$ 2%	9,44E-03 $\pm$ 4%	1,15E-01 $\pm$ 1%	6,28E-02 $\pm$ 5%
Profundidad de capa nitrurada ( $\mu\text{m}$ )	89,21		112,85	
Profundidad de capa blanca ( $\mu\text{m}$ )	36		77	
Profundidad de la zona de difusión ( $\mu\text{m}$ )	53,21		35,85	

Los resultados obtenidos al aplicar el ensayo de abrasión a todas las probetas indicaron que la pérdida volumétrica fue mayor en las probetas sin tratamiento termoquímico para ambos aceros (en la condición de sustrato inicial), resaltando así

la importancia de realizar la nitruración en baño de sales que permiten una mejora considerable de la resistencia al desgaste abrasivo de todo el sistema.

## **CAPITULO IV**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1 Conclusiones**

Debido a la formación de compuestos intermetálicos a base de nitruro de hierro ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) en la zona de difusión, el valor de dureza disminuye desde la superficie hacia el sustrato hasta llegar a un valor de dureza nominal promedio correspondiente a cada acero.

El estudio metalográfico mostró que el acero AISI H13 obtuvo una mayor capa nitrurada con  $112,85 \mu\text{m}$ , de la cual el 68,23% perteneció a la capa blanca, comparado con el acero AISI D2 que obtuvo  $89,21 \mu\text{m}$  y el 40,35% de este correspondió a la capa blanca. Lo que indica que el espesor de la zona de difusión disminuye con el aumento de los elementos aleantes dentro del acero, ya que estos aumentan la formación de nitruros.

En las superficies de ensayo de ambos aceros predominan canales y surcos generados por la penetración de las partículas abrasivas, lo que produce deformación plástica y corte del material, en el caso del acero AISI H13 estos surcos y canales son más pronunciados que en el acero AISI D2 para las mismas condiciones de ensayo.

La deformación observada en las probetas ensayadas y su morfología afirman que los aceros, aun con modificación superficial, siempre presentan cierto grado de ductilidad.

El estudio demostró que la modificación superficial si mejora las propiedades mecánicas de los aceros estudiados y su comportamiento ante el desgaste abrasivo. Aunque la dureza no es el único parámetro a considerar en la alta resistencia al

desgaste abrasivo los aceros, en nuestro estudio se demuestra que es un parámetro importante, ya que en el acero AISI H13 la velocidad de desgaste fue mayor que en acero AISI D2.

Debido a que la capa blanca en ambos casos de estudio supera  $12,7 \mu\text{m}$  el astillamiento en la superficie generó un área denominada zona de socavadura y esta área aumenta en la medida en que aumenta el espesor de capa blanca. Los ensayos demostraron que en las condiciones que no existía capa blanca de igual forma era inexistente la zona de socavadura.

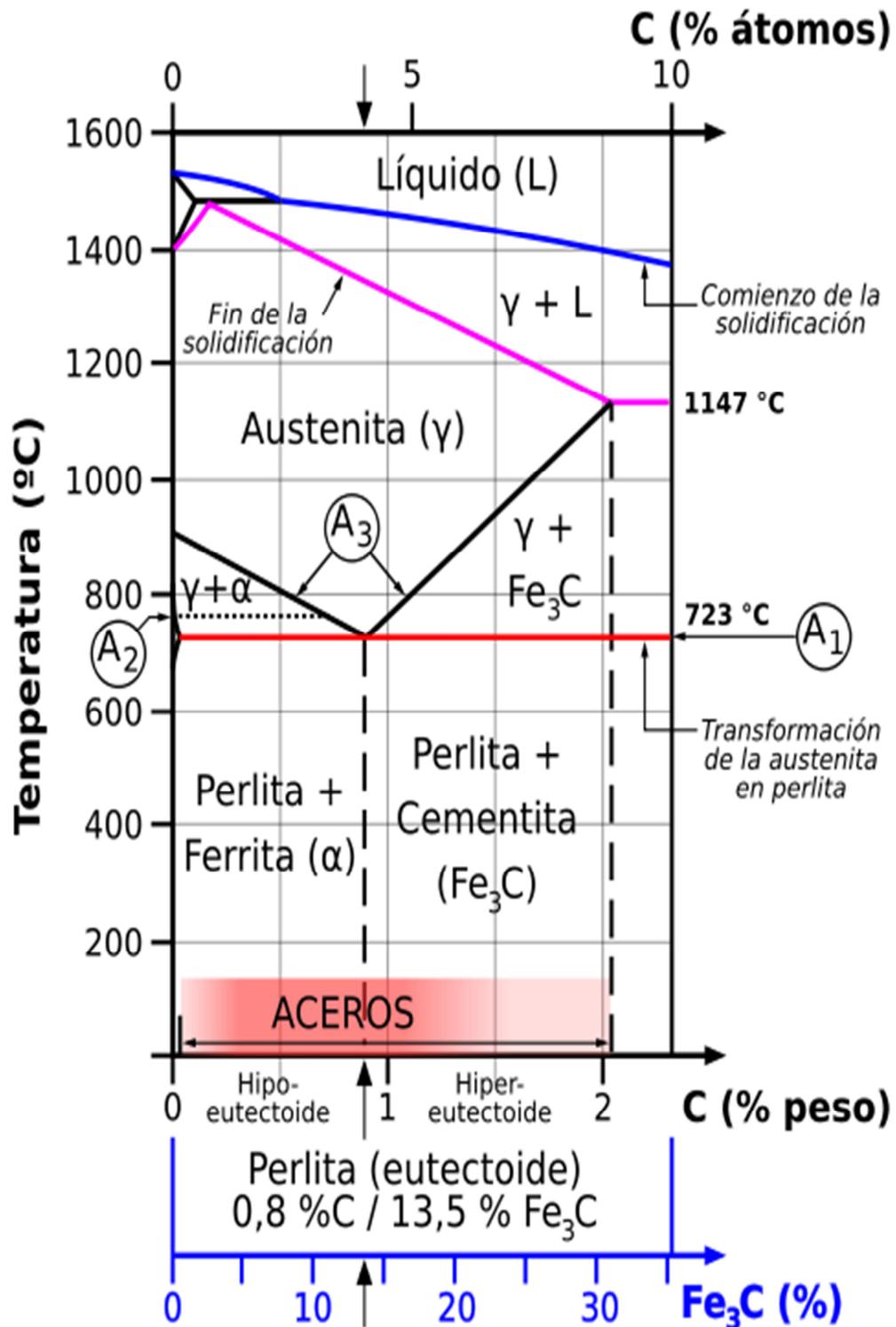
Las micrografía obtenidas por MEB muestran que los daños generados en la superficie de los aceros objeto de estudio, son inversamente proporcionales a la carga de ensayo.

## **4.2 Recomendaciones**

Realizar la optimización del proceso de nitruración en baño sales que permita controlar el espesor de la capa blanca, así como de la capa de difusión, permitiendo de esta forma mejorar las propiedades mecánicas y el comportamiento ante el desgaste de estos aceros.

Realizar otros tipos de tratamientos termoquímicos que permitan nitrurar estos aceros con el fin de determinar cuál es el tratamiento térmico idóneo capaz de maximizar la resistencia al desgaste abrasivo.

## **APÉNDICES**



Apéndice 1. Diagrama Fe-C

# Metallographic preparation of nitrided and nitrocarburised components

Struers

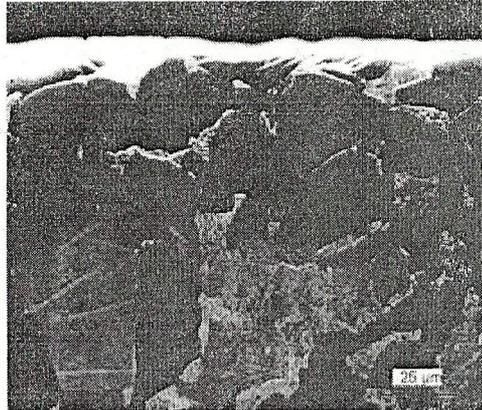
NOTES

**Nitriding** is a thermochemical process by which the surface of a ferrous metal is enriched with nitrogen to improve the wear resistance of components. In **nitrocarburising** not only nitrogen but also small amounts of carbon are involved in the process. The result is a nitrided layer consisting of the compound layer ("white layer") and the diffusion zone immediately below the compound layer.

The nitriding and nitrocarburising process using gas or salt bath was developed in the early 20th century in Germany and the United States. The development of ion or plasma nitriding started in the 1930s but was not commercially used until the 1970s. All three nitriding methods have advantages and the selection of a particular method depends on the specific application of the nitrided component.

Nitriding produces a hard, wear resistant layer on carbon and low alloy steels and cast iron. In addition, it considerably improves fatigue strength and by oxidizing the nitrided surface, it enhances corrosion resistance.

The main advantage of nitriding and nitrocarburising over other means of surface hardening is the low process temperature (500-600°C), preferably 580°C. Components can often be nitrided in the fully hardened and tempered condition without the core properties being adversely affected. An additional advantage of the low temperature process is the low risk of distortion. Consequently the parts can be machined to final

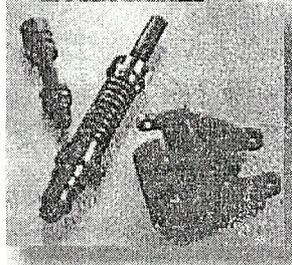
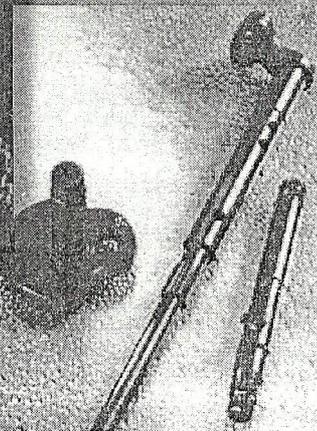


Nitrided steel, colour etched with Beraha's reagent

dimensions and do not need costly finishing work such as grinding or straightening after nitriding.

Nitriding and nitrocarburising are mainly used for ferrous components such as valves, camshafts and piston rods in the mechanical engineering and automotive industries. Other applications are cutting tools or large forming dies. Cast iron parts, such as pump and gear houses, can also be nitrided.

Metallography of nitrided and nitrocarburised components is mainly used for controlling the nitriding process through examination of the layer. The white layer, diffusion zone and porous zone are measured and evaluated. In addition, failure analyses of used parts are carried out to see if faulty material, surface deterioration or the nitriding process were contributing factors.



## Difficulties in the preparation of nitrided parts:

- Chipping and cracking in the layer
- Edge-rounding

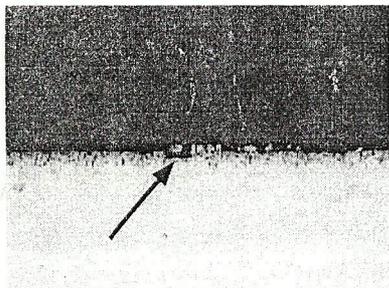


Fig. 1: Shrinkage gap between specimen and mounting resin can cause flaking of the nitrided layer and trap abrasives

500x

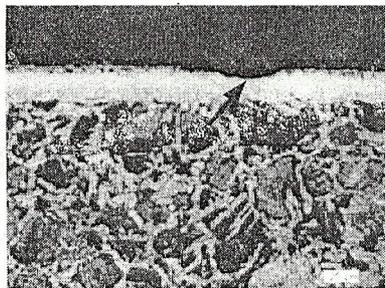


Fig. 2: Without edge retention, the layer is not in focus at high magnification

## Solution:

- Proper mounting
- Plane grinding with SiC paper
- Fine grinding with diamond
- Diamond polishing on hard cloths

# Formation and composition of the nitrided layer

\* At nitriding temperature the nitrogen diffuses into the steel surface and reacts with iron, forming  $\gamma'$  iron nitride ( $Fe_4N$ ), containing up to 6 wt % N. With increasing nitrogen the  $\epsilon$ -phase ( $Fe_3N$ ) is formed, which can absorb up to 11 wt % N. These two iron nitride phases,  $\epsilon + \gamma'$ , form the compound layer, also called "white layer", because it stays white when the steel is etched with Nital. This compound layer does not contain any metal but consists of a non-metallic phase formed by iron and nitrogen that can be called a "nitride ceramic". In the outer areas of the compound layer a porous zone can be found (see Fig. 3).

The percentage of  $\gamma'$  and  $\epsilon$ -nitride depends on the carbon content of the steel: higher carbon content promotes the formation of  $\epsilon$ , lower carbon content forms more  $\gamma'$  iron nitride.

With an optical microscope the differentiation of  $\epsilon$  and  $\gamma'$  iron nitrides in the compound layer is only possible by using very special and difficult etching methods. A correct analysis of the composition can only be made by quantitative structural x-ray analysis using deeply penetrating radiation.

The compound layer is relatively hard and the hardness increases with increasing content of nitride forming alloying elements, at the same time the case depth decreases. Nitrided carbon steels have a surface hardness of 300-400 HV and alloyed steels from 700 HV to more than 1000 HV.

Below the compound zone is the diffusion zone containing nitrogen in solid solution. In addition, it has stable metal nitrides formed by the various alloying elements of

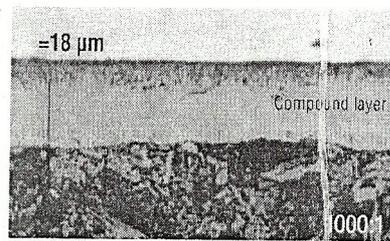


Fig. 3: Details of composition of nitrided layer

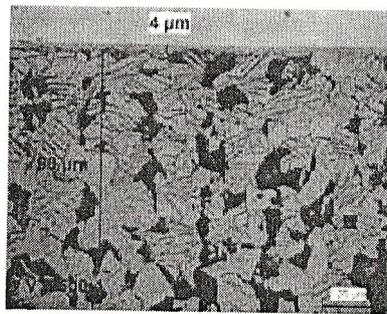


Fig. 4: Nitrocarburised carbon steel after heating for 45 min/300°C, etched with 1% Nital showing nitride needles in the diffusion zone.

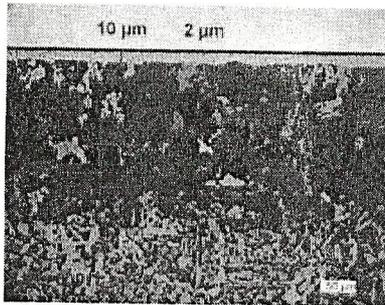
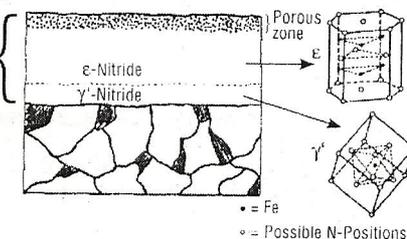


Fig. 5: Alloyed steel, nitrocarburised, etched with 1% Nital, shows dark diffusion zone, and white compound layer with dark oxide coat.

the steel, such as aluminium, molybdenum, chromium and tungsten.

Because of their sub-microscopically fine distribution the nitrides in the diffusion zone of low carbon steels generally can not be seen after etching of the metallographic sample. However, after heating the sample to tempering temperature (200-400°C for 15-30 min), the nitrogen in solid solution precipitates in the form of  $\gamma'$  nitride needles. These nitride needles can be etched so that the diffusion zone becomes visible and its thickness can be measured (Fig. 4). On alloy steels the diffusion zone will be etched dark with Nital, but the nitrides can not be resolved with an optical microscope (Fig. 5).

\* The thickness of the white layer and the diffusion zone depends on various parameters of which the most important ones are time, temperature and steel composition. The white layer can be between 0-20  $\mu m$  and the diffusion zone up to 0.8 mm, depending on the requirements of the application.



# Nitriding processes and application of nitrided parts

Before nitriding, the components have to be thoroughly cleaned and degreased. Any surface contamination from grinding particles, oil or metal chips will result in an uneven formation of the nitrided layer. This can cause cracks in the coating which leads to flaking and corrosion (see Figs. 6 and 7) After cleaning, the parts are dried and preheated and then transferred to the actual nitriding environment.

The various nitriding processes can be differentiated mainly by their nitrogen source and the energy supply. Salt bath-, gas- and plasma nitriding have different advantages regarding investment cost, process time, environment, safety and quality.

The properties of the resulting nitrided or nitrocarburised surface are in many cases independent of the production process.

The required case depth is determined by the application of the nitrided component and can be regulated through the nitriding temperature and time.

In the following paragraphs the different nitriding processes are briefly described and the application of the nitrided parts mentioned.

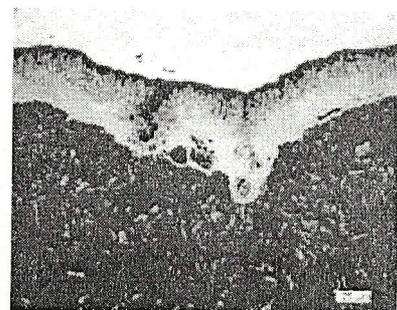
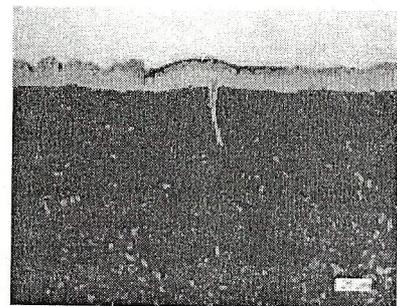


Fig. 6 and 7: Impurities in the steel and on the surface can lead to faulty areas in the nitride layer and cause cracking or corrosion.

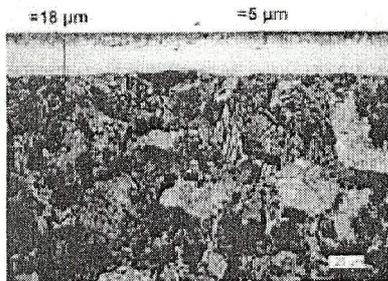


Fig. 8: Salt bath nitrocarburised alloyed steel (16MnCr5), etched with 1% Nital, diffusion zone is etched dark, compound layer with porous zone shows white.

### Salt bath nitrocarburising

Salt bath nitrocarburizing is carried out in gas or electrically heated crucible furnaces. The preferred material for the crucible is titanium. After preheating to 350°C, the components are submerged into the salt-bath, either hanging or lying in charging racks, or as bulk material in stainless steel or Inconel baskets. The salt bath consists of alkaline cyanate and alkaline carbonate. Through oxidation and thermal reaction with the immersed component surface, at nitriding temperature the alkaline cyanate releases nitrogen and carbon which diffuse into the surface of the component. Pure nitriding is not possible with the salt bath as small amounts of carbon will always diffuse into the surface. The usual process parameters are 90 min at 580°C.

The active nitrogen releasing agent of the salt bath is the alkaline cyanate. Through the reaction of the cyanate ions the amount of alkaline carbonate in the bath increases. By adding an organic polymer the optimal cyanate content of the bath is replenished again.

After nitrocarburising, quenching in an oxidizing salt bath (380-420°C) produces a black iron oxide ( $Fe_3O_4$ ) on the surface. It fills the pores of the compound layer and acts as additional corrosion resistant protection. After cooling to room temperature the components can be polished and then re-oxidised depending on the application.

Nitrocarburised cases are particularly resistant against abrasive wear, scuffing, sliding friction and corrosion. The porous surface can retain lubricants which adds to the running properties of, for instance, camshafts. (Fig. 8)

Salt bath nitrocarburising is a fast, flexible and economical process. Typical applications are parts for the automotive industry such as piston rods, crank and camshafts, valves and gears. In addition, nitrocarburised components are used in the aircraft and off-shore industry and in mechanical engineering.

**Gas nitriding and nitrocarburising** generally takes place in a sealed, bell-type nitriding furnace which provides good gas circulation. The process is mainly controlled by the degree of dissociation of ammonia. The ammonia gas reacts at 500-520°C with the steel surface and decomposes, thereby releasing nascent nitrogen which diffuses into the steel surface. As gas nitriding uses a lower temperature, process times are 40-80 hrs. By adding gases containing carbon, gas nitrocarburising is also possible (Figs. 9 and 10). As a consequence process times are reduced.

The formation and properties of the compound layer and diffusion zone are similar to those produced by salt bath nitriding. However, the thickness of the compound zone can be more accurately controlled or even completely suppressed with gas nitriding. This makes the steel surface very hard but not brittle. Deep diffusion zones can be produced that have a beneficial effect on mechanical strain caused by vi-

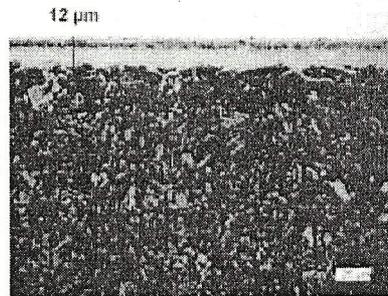


Fig. 9: Alloyed steel (42CrMo4), gas nitrided 510°C/36 hrs, etched with 1% Nital, showing dark diffusion zone, white compound layer with porous zone.

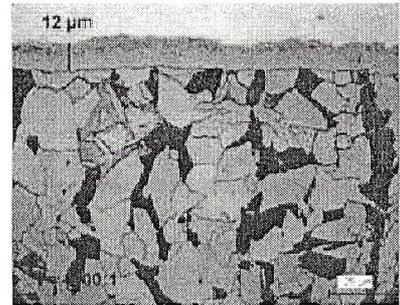


Fig. 10: Gas nitrocarburised carbon steel, 580°C/1.5 hr.

bration and torsion. Components with bore holes, undercuts and cavities, for instance sintered steels, are suited for gas nitriding because the gas can easily enter everywhere as it circulates in the retort. Copper plating or special resistant materials can be used for masking areas that should not be nitrided.

Gas nitrided parts are typically machine spindles, ductile iron pump housings, door lock mechanisms, water pump components and pistons for gas compressors.

**Plasma nitriding and nitrocarburising** is carried out in a nitrogen - hydrogen atmosphere at 400-600°C and a pressure of approx. 50-500 Pa. For nitrocarburising, gases containing carbon, such as methane, are added. The plasma is produced in a vacuum chamber with a high voltage whereby the work-piece acts as cathode and the vacuum vessel as anode. Because nitrogen and hydrogen are brought into the vacuum chamber as individual gases, the ratio of nitrogen to hydrogen can be controlled allowing variations of thickness and composition of the compound layer. Consequently, not only low carbon steels, but also austenitic steels, powder metallurgy ferrous metals and refractory metals can be plasma nitrided.

# Difficulties during metallographic preparation of nitrided steels

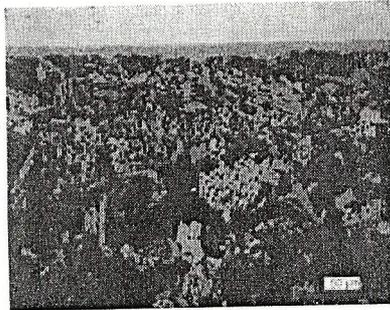


Fig.11: Alloyed steel (16MnCr5N), plasma nitrocarburised, 570°C/6 hrs

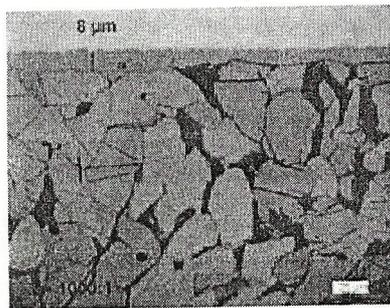


Fig.12: Carbon steel, plasma nitrocarburised, 570°C/6 hrs. Both nitride layers are without porous zone and have a very fine surface finish.

Plasma nitriding gives a very fine surface finish, almost free of pores, that lends itself for a high polish (fig.11 and 12). Due to this low porosity plasma nitrided and nitrocarburised cam- and crank shafts are for instance used for high performance motors. As plasma nitriding allows a large variety of nitride layers, its fields of application are also varied. Examples are the surface treatment of forming dies such as large plastic extrusion dies and auto body blanking dies, tools for stainless steel deep drawing, casting -, hot forging- and extrusion dies. Other specific applications are corrosion resistant engine valves, high speed steel cutting tools and many applications in mechanical engineering.

The main problem during the preparation of nitrided components is the chipping of the porous zone and cracking of the compound zone (see Figs.1, 2 and 13). This damage is mostly introduced during the first grinding step. Incorrect mounting and long polishing with soft cloths results in rounded edges. As the evaluation of the coating is carried out with 1000x magnification, rounded edges lead to incorrect thickness measurements.

## Recommendations for the preparation of nitrided steels

To avoid damage to the nitride layer, it is recommended that **sectioning** is carried out carefully on a cut-off machine with water cooling, suitable for metallographic purposes. For cutting an aluminium oxide wheel is selected according to the hardness of the nitrided component. This is usually a medium hard to soft cut-off wheel.

**Mounting:** To avoid shrinkage gaps hot compression mounting with a fibre rein-

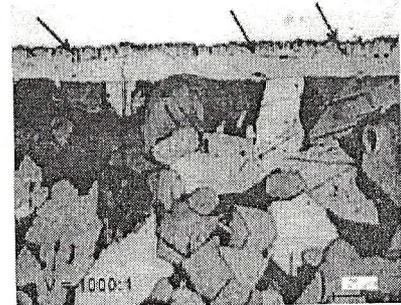


Fig.13: Cracks in the coating caused during preparation.

forced resin is recommended (IsoFast, DuroFast). In addition, wrapping the sectioned specimen before mounting with a thin, pure copper foil (0.05 mm) promotes good edge retention.\* Also, the copper colour enhances the contrast of the coating against the mounting resin, which is particularly helpful when

\*The foil is stretched like a ribbon with the blade of a pair of scissors, attached to the sample with instant glue, wrapped around and attached again. Then the excess foil is bent over the surface and pressed down tightly with fingertip or nail. The copper foil on the sample surface is removed by the subsequent plane grinding.

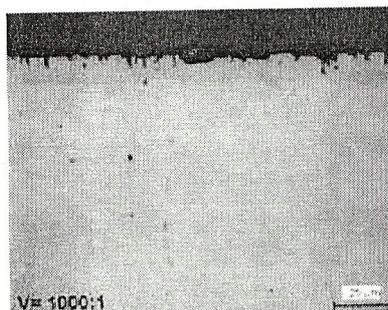


Fig.14: Alloy steel (16MnCr5N) salt bath nitrocarburised, mounted without copper foil. There is flaking of the nitride layer and the thin oxide layer can not be distinguished from mounting resin.

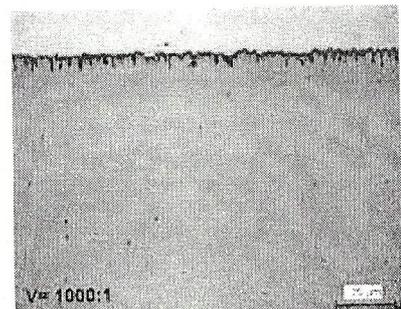


Fig.15: Same as Fig.14, mounted with copper foil, dark oxide layer is clearly visible against the copper colour of foil. The layer is well preserved.

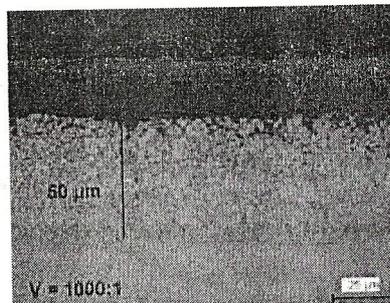


Fig.16: High alloy steel (X45CrSi9V), salt bath nitrocarburised, oxidised, etched with 1% Nital, diffusion zone is etched dark, compound layer can not be distinguished from mounting resin.

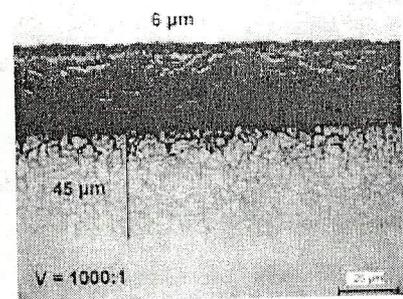


Fig.17: Same as Fig.16, mounted with copper foil, the compound layer can clearly be seen against the copper foil and can be measured.

working with oxidised components (compare Figs. 14 and 15, 16 and 17).

**Grinding and polishing:** Plane grinding is carried out with silicon carbide paper 180# and/or 200#. To ensure edge retention, it is important to fine grind with diamond on a fine grinding disc (MD-Largo). This is followed by a diamond polish on a synthetic silk cloth (MD-Dac), and a brief final polish with 1 µm diamond or colloidal silica. The following method has given good, reproducible results for nitrided steels. The preparation data are for 6 mounted samples, 30 mm diameter, clamped in a holder. Depending on sample size and type of coating the polishing times can be slightly modified.

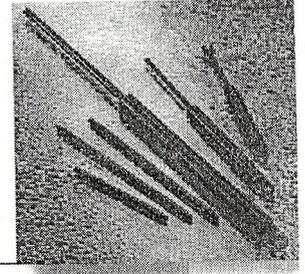
**Etching:** The nitrided coating is first examined unetched to evaluate the porous zone and the shape and size of the pores. Etching with 1-3% Nital shows the white compound layer and in alloyed steels the dark diffusion zone. For a good nitride case a very good base material is essential. Cracks, inclusions, banding or deformation of the initial surface decisively influence the quality of the nitrided layer. Therefore it is also important to evaluate the structure of the base material.

In low carbon steels the diffusion zone can be identified by heating the sample at 300°C / 45 min, and then etching with 1% Nital (see Fig. 4)

#### Grinding

Step	PG	FG
Surface	SiC-paper 220#	MD-Largo
Suspension		DiaPro Allegro/Largo
Lubricant	Water	
rpm	300	150
Force [N]	150	150
Time	As needed	5 min.

Table 1:  
Preparation method for  
nitrided steels



#### Polishing

Step	DP 1	DP 2	OP*
Surface	MD-Dac	MD-Nap	MD-Chem
Suspension	DiaPro Dac	DiaPro Nap B	OP-AA or OP-U
rpm	150	150	150
Force [N]	180	150	90
Time	6 min.	1 min.	1 min.

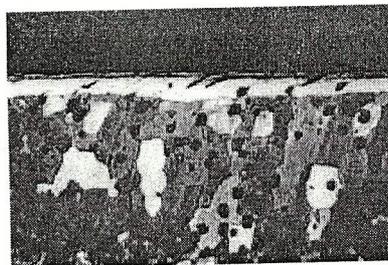
\*Optional step

As an alternative to DiaPro polycrystalline diamond suspension P, 9 µm, 3 µm and 1 µm can be used together with blue lubricant.

#### Summary

Nitriding is a thermo chemical process by which the surface of a ferrous metal is enriched with nitrogen to improve the wear and corrosion resistance of components. Three nitriding methods can be used: salt bath nitrocarburising, nitriding and nitrocarburising in gas or plasma. Nitriding and nitrocarburising result in the formation of a very hard surface consisting of the compound layer and the diffusion zone. Metallography of nitrided layers is mainly used for quality control, controlling the nitriding process and for failure analysis.

The main problems when preparing nitrided layers are rounded edges and cracking or chipping of the layer during grinding and polishing. By carefully wrapping the sample in a thin copper foil before hot compression mounting, this problem can be overcome. For fine grinding silicon carbide paper or diamond on a fine grinding disc can be used, whereby the latter results in a better edge retention. The subsequent diamond polishing needs to be carried out as long as needed to remove any damage in the layer introduced by the preparation.



Ferritic nodular cast iron, gas nitrided,  
etched with 3% nital.

500x



**Struers A/S**  
 Pederstrupvej 84  
 DK-2750 Ballerup, Denmark  
 Phone +45 44 600 800  
 Fax +45 44 600 801  
 struers@struers.dk

## Authors

Elisabeth Weidmann, Anne Guesnier,  
 Struers A/S, Copenhagen, Denmark

## Acknowledgement

We wish to thank **Durferrit GmbH**, Mannheim, Germany, for the permission to reproduce photographs and drawings.

We wish to thank **Dr. Ulrich Baudis** for his professional support. We want to especially thank **Ms. Sabine Riesbeck** for the sample preparation and generously supplying the colour micrograph on page 1 and Figs. 2-17.

We wish to thank **Eltro GbmH**, Baesweiler, Germany, for supplying plasma nitrided sample material.

We wish to thank **Carl Gommann KG**, Remscheid, Germany, for supplying gas nitrided sample material.

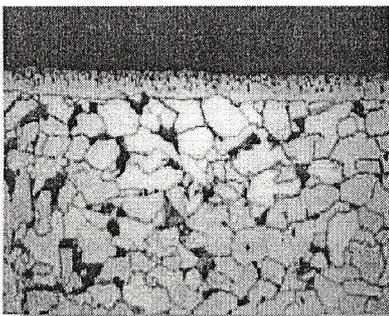
## Bibliography

Practical nitriding and ferritic microcarburizing,  
 David Pye, ASM International, 2003

ASM Handbook, Vol. 9, Metallography and  
 Microstructure, ASM, 2004

Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen, Nitrieren  
 und Nitrocarburieren, D. Liedtke u. a., expert verlag,  
 Renningen, 2006

Technologie der Salzschnmelzen, Ulrich Baudis und  
 Michael Kreuzt, Die Bibliothek der Technik, Band 224,  
 verlag moderne industrie, 2001



White layer with porous zone on  
 low carbon steel

500x

## USA and CANADA

**Struers Inc.**  
 24766 Detroit Road  
 Westlake, OH 44145-1598  
 Phone +1 440 871 0071  
 Fax +1 440 871 8188  
 info@struers.com

## SWEDEN

**Struers A/S**  
 Smållövågen 1  
 P.O. Box 11085  
 SE-161 11 Bromma  
 Telefon +46 (0)8 447 53 90  
 Telefax +46 (0)8 447 53 99  
 info@struers.dk

## FRANCE

**Struers S.A.S.**  
 370, rue du Marché Rollay  
 F-94507 Champigny  
 sur Marne Cedex  
 Téléphone +33 1 5509 1430  
 Télécopie +33 1 5509 1449  
 struers@struers.fr

## NEDERLAND/BELGIE

**Struers GmbH Nederland**  
 Electraweg 5  
 NL-3144 CB Maassluis  
 Tel. +31 (0) 10 599 72 09  
 Fax +31 (0) 10 599 72 01  
 glen.van.vugt@struers.de

## BELGIQUE (Wallonie)

**Struers S.A.S.**  
 370, rue du Marché Rollay  
 F-94507 Champigny  
 sur Marne Cedex  
 Téléphone +33 1 5509 1430  
 Télécopie +33 1 5509 1449  
 struers@struers.fr

## UNITED KINGDOM

**Struers Ltd.**  
 Erskine Ferry Road,  
 Old Kilpatrick  
 Glasgow, G60 5EU  
 Phone +44 1389 877 222  
 Fax +44 1389 877 600  
 info@struers.co.uk

## JAPAN

**Marumoto Struers K. K.**  
 Takara 3rd Building  
 18-6, Higashi Ueno 1-chome  
 Taiko-ku, Tokyo 110-0015,  
 Phone +81 3 5688 2914  
 Fax +81 3 5688 2927  
 struers@struers.jp

## CHINA

**Struers (Shanghai) Ltd.**  
 Room 2705, Nanzheng Bldg,  
 580 Nanjing Road (W)  
 CN - Shanghai 200041  
 Phone +86 (21) 5228 8811  
 Fax +86 (21) 5228 8821  
 struers.cn@struers.dk

## DEUTSCHLAND

**Struers GmbH**  
 Karl-Arnold-Strasse 13 B  
 D-47877 Willich  
 Telefon +49(0)2154) 486-0  
 Telefax +49(0)2154) 486 222  
 verkauf.struers@struers.de

## ÖSTERREICH

**Struers GmbH**  
 Zweigniederlassung Österreich  
 Gmzkeyplatz 10  
 A-5020 Salzburg  
 Telefon +43 662 625 711  
 Telefax +43 662 625 711 78  
 stefan.lintschinger@struers.de

## SCHWEIZ

**Struers GmbH**  
 Zweigniederlassung Schweiz  
 Weissenbrunnstrasse 41  
 CH-8903 Birmensdorf  
 Telefon +41 44 777 63 07  
 Telefax +41 44 777 63 09  
 rudolf.weber@struers.de

## CZECH REPUBLIC

**Struers GmbH**  
 Organizační složka  
 Milady Horákové 110/96  
 CZ-160 00 Praha 6 - Bubeneč  
 Tel: -420 233 312 625  
 Fax: +420 233 312 640  
 david.cernicky@struers.de

## POLAND

**Struers Sp. z o.o.**  
 Oddział w Polsce  
 ul. Lirowa 27  
 PL-02-387 Warszawa  
 Tel. +48 22 824 52 80  
 Fax +48 22 882 06 43  
 grzegorz.uszynski@struers.de

## HUNGARY

**Struers GmbH**  
 Magyarországi fióktelep  
 Puskás Tivadar u. 4  
 H-2040 Budaörs  
 Phone +36 (23) 428-742  
 Fax +36 (23) 428-741  
 zoltan.kiss@struers.de

## SINGAPORE

**Struers A/S**  
 10 Finos Road 8,  
 #12-06 North Lobby  
 Singapore Post Centre  
 Singapore 408600  
 Phone +65 6299 2268  
 Fax +65 6299 2661  
 struers.sg@struers.dk



Designation: G 65 - 81

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS  
1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103

Reprinted from the Annual Book of ASTM Standards, Copyright ASTM  
If not listed in the current combined index, will appear in the next edition.

## Standard Practice for CONDUCTING DRY SAND/RUBBER WHEEL ABRASION TESTS<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation G 65; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

### 1. Scope

1.1 This practice covers laboratory procedures for determining the resistance of metallic materials to scratching abrasion by means of the Dry Sand/Rubber Wheel Test. It is the intent of this test method to produce data that will reproducibly rank materials in their resistance to scratching abrasion under a specified set of conditions.

1.2 Abrasion test results are reported as volume loss in cubic millimetres for the particular test procedure specified. Materials of higher abrasion resistance will have a lower volume loss.

NOTE 1—In order to attain uniformity among laboratories, it is the intent of this practice to require that volume loss due to abrasion be reported only in the metric system as cubic millimetres.  $1 \text{ mm}^3 = 6.102 \times 10^{-5} \text{ in}^3$ .

1.3 This practice covers four recommended procedures which are appropriate for specific degrees of wear resistance or thicknesses of the test material.

1.3.1 *Procedure A*—This is a relatively severe test which will rank metallic materials on a wide volume loss scale from low to extreme abrasion resistance. It is particularly useful in ranking materials of medium to extreme abrasion resistance.

1.3.2 *Procedure B*—A short-term variation of Procedure A.

1.3.3 *Procedure C*—A short-term variation of Procedure A for use on thin coatings.

1.3.4 *Procedure D*—This is a lighter load variation of Procedure A which is particularly useful in ranking materials of low abrasion resistance. It is also used in ranking materials of a specific generic type or materials which

would be very close in the volume loss rates as developed by Procedure A.

### 2. Applicable Documents

#### 2.1 ASTM Standards:

D 2240 Test for Rubber Property—Durometer Hardness<sup>2</sup>

E 11 Specification for Wire Cloth Sieves for Testing Purposes<sup>3</sup>

E 122 Recommended Practice for Choice of Sample Size to Estimate the Average Quality of a Lot or Process<sup>4</sup>

E 177 Recommended Practice for the Use of the Terms Precision and Accuracy as Applied to Measurement of a Property of a Material<sup>5</sup>

G 40 Terminology Relating to Erosion and Wear<sup>6</sup>

2.2 *Special Technical Publication*: STP 15D Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis<sup>7</sup>

2.3 *American Foundrymen's Society Standards*:

AFS Foundry Sand Handbook, 7th Edition<sup>8</sup>

<sup>1</sup> This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G-2 on Erosion and Wear and is the direct responsibility of Subcommittee G02.30 on Wear.

Current edition approved Oct. 30, 1981. Published December 1981. Originally published as G 65 - 80. Last previous edition G 65 - 80.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Parts 35 and 37.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Parts 13, 14, 15, 18, 26, 30, and 41.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Parts 15 and 41.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Parts 13, 14, 15, 17, 35, and 41.

<sup>6</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Part 10.

<sup>7</sup> *Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis*, ASTM STP 150, Am. Soc. Testing Mats., 1976.

<sup>8</sup> Available from American Foundrymen's Society, Golf and Wolf Roads, Des Plaines, Ill. 60016.

### 3. Summary of Practice

3.1 The Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion test (Fig. 1) involves the abrading of a standard test specimen with a grit of controlled size and composition. The abrasive is introduced between the test specimen and a rotating wheel with a chlorobutyl rubber tire or rim of a specified hardness. This test specimen is pressed against the rotating wheel at a specified force by means of a lever arm while a controlled flow of grit abrades the test surface. The rotation of the wheel is such that its contact face moves in the direction of the sand flow. Note that the pivot axis of the lever arm lies within a plane which is approximately tangent to the rubber wheel surface, and normal to the horizontal diameter along which the load is applied. The test duration and force applied by the lever arm is varied as noted in Procedure A through D. Specimens are weighed before and after the test and the loss in mass recorded. It is necessary to convert the mass loss to volume loss in cubic millimetres, due to the wide differences in the density of materials. Abrasion is reported as volume loss per specified procedure.

### 4. Definitions

4.1 *abrasive wear*—wear due to hard particles or hard protuberances forced against and moving along a solid surface (Definitions G 40).

NOTE 2—This definition covers several different wear modes or mechanisms that fall under the abrasive wear category. These modes may degrade a surface by scratching, cutting, deformation, or gouging. (1 and 6).

### 5. Significance and Use (1 through 7)

5.1 The severity of abrasive wear in any system will depend upon the abrasive particle size, shape, and hardness, the magnitude of the stress imposed by the particle, and the frequency of contact of the abrasive particle. In this test method these conditions are standardized to develop a uniform condition of wear which has been referred to as scratching abrasion. (1 and 2). The value of the test method lies in predicting the relative ranking of various materials of construction in an abrasive environment. Since the test method does not attempt to duplicate all of the process conditions (abrasive size, shape, pressure, impact, or cor-

rosive elements), it should not be used to predict the exact resistance of a given material in a specific environment. Its value lies in predicting the ranking of materials in a similar relative order of merit as would occur in an abrasive environment. Volume loss data obtained from test materials whose lives are unknown in a specific abrasive environment may, however, be compared with test data obtained from a material whose life is known in the same environment. The comparison will provide a general indication of the worth of the unknown materials if abrasion is the predominant factor causing deterioration of the materials.

### 6. Apparatus and Material<sup>9</sup>

6.1 Figure 2 shows a typical design and Figs. 3 and 4 are photographs of the test apparatus which may be constructed from readily available materials. Also, see Ref (2). Several elements are of critical importance to ensure uniformity in test results among laboratories. These are the type of rubber used on the wheel, the type of abrasive and the shape, positioning and the size opening of the sand nozzle, and a suitable lever arm system to apply the required force.

6.2 *Rubber Wheel*—The wheel shall consist of a steel disk with an outer layer of chlorobutyl rubber molded to its periphery. Uncured rubber shall be bonded to the rim and fully cured in a steel mold. The optimum hardness of the cured rubber is Durometer A-60. A range from A 58 to 62 is acceptable. At least four hardness readings shall be taken on the rubber approximately 90° apart around the periphery of the wheel using a Shore A Durometer tester in accordance with Method D 2240. The gage readings shall be taken after a dwell time of 5 s. The recommended composition of the rubber and a qualified molding source is noted in Table 1. (See 9.9 for preparation and care of the rubber wheel before and after use and see Figs. 2 and 5.)

6.3 *Abrasive*—The type of abrasive shall be a rounded quartz grain sand as typified by AFS 50/70 Test Sand (Fig. 7) furnished by the qual-

<sup>9</sup> Original users of this test method fabricated their own apparatus. Commercially available machines are available from the following manufacturers of abrasion testing equipment: Faville-Le Valley Corp., 2055 Comprehensive Dr., Aurora, Ill. 60505 and Fargo Machine and Tool Co., 1801 Caniff Ave., Detroit, Mich. 48212.

ified source.<sup>10</sup> The moisture content shall not exceed 0.5 weight %. Sand that has been subjected to dampness or to continued high relative humidity may take on moisture, which will affect test results. Moisture content may be determined by measuring the weight loss after heating a sample to approximately 120°C (250°F) for 1 h minimum. If test sand contains moisture in excess of 0.5 % it shall be dried by heating to 100°C (212°F) for 1 h minimum and the moisture test repeated. In high-humidity areas sand may be effectively stored in constant temperature and humidity rooms or in an enclosed steel storage bin equipped with a 100-W electric bulb. Welding electrode drying ovens, available from welding equipment suppliers are also suitable. Multiple use of the sand may affect test results and is not recommended. AFS 50-70 Test Sand is controlled by the qualified source<sup>11</sup> to the following size range using U.S. Sieves (Specification E 11).

U.S. Sieve Size	Sieve Opening	% Retained on Sieve
40	425 $\mu\text{m}$ (0.0165 in.)	none
50	300 $\mu\text{m}$ (0.0117 in.)	5 max.
70	212 $\mu\text{m}$ (0.0083 in.)	95 min.
100	150 $\mu\text{m}$ (0.0059 in.)	none passing

6.4 *Sand Nozzle*—Figure 6 shows the fabricated nozzle design which was developed to produce an accurate sand flow rate and proper shape of sand curtain for test procedures. The nozzle may be of any convenient length that will allow for connection to the sand hopper using plastic tubing. In new nozzles, the rate of sand flow is adjusted by grinding the orifice of the nozzle to increase the width of the opening to develop a sand flow rate of 250 to 350 g/min. During use, the nozzle opening must be positioned as close to the junction of the test specimen and the rubber wheel as the design will allow. (See Fig. 8.)

Any convenient material of construction which is available as welded or seamless pipe may be used for the construction of the fabricated nozzle. Stainless steel is preferred because of its corrosion resistance and ease of welding. Copper and steel are also used successfully.

6.4.1 *Formed Nozzle*—Nozzles formed from tubing may be used only when they duplicate the size and shape (rectangular orifice and taper), and the sand flow characteristics (flow rate and streamlined flow) of the fabricated nozzle. (See Figs. 6 and 9.)

6.4.2 *Sand Flow*—The nozzle must produce a sand flow rate of 250 to 350 g/min (0.55 to 0.77 lb/min).

6.4.3 *Sand Curtain*—Figure 9 shows the proper streamlined flow and the narrow shape of the sand curtain as it exits from the sand nozzle. A turbulent sand flow as depicted in Fig. 10 will tend to produce low and inconsistent test results. It is intended that the sand flows in a streamlined manner and passes between the specimen and rubber wheel.

6.5 *Motor Drive*—The wheel is driven by a nominally 0.7-kW (1-hp) d-c motor through a 10/1 gear box to ensure that full torque is delivered during the test. The rate of revolution (200  $\pm$  10 rpm) must remain constant under load. Other drives producing 200 rpm under load are suitable.

6.6 *Wheel Revolution Counter*—The machine shall be equipped with a revolution counter that will monitor the number of wheel revolutions as specified in the procedure (Section 9). It is recommended that the incremental counter have the ability to shut off the machine after a preselected number of wheel revolutions or increments up to 12 000 revolutions is attained.

6.7 *Specimen Holder and Lever Arm*—The specimen holder is attached to the lever arm to which weights are added, so that a force is applied along the horizontal diametral line of the wheel. An appropriate number of weights must be available to apply the appropriate force (Table 2) between the test specimen and the wheel. The actual weight required should not be calculated, but rather should be determined by direct measurement by noting the load required to pull the specimen holder away from the wheel. A convenient weight system is a can filled with sand (see Fig. 2).

6.8 *Analytical Balance*—The balance used to measure the loss in mass of the test specimen shall have a sensitivity of 0.001 g. Procedure C requires a sensitivity of 0.0001 g.

6.9 *Enclosure, Frame, and Abrasive Hopper*—Figures 3 and 4 are photographs of a typical test apparatus. The size and shape of

<sup>10</sup> Available from Woodlawn Rubber Co., 6130 Interstate Circle, Cincinnati, Ohio 45242.

<sup>11</sup> Available from Ottawa Silica co., P.O. Box 577, Ottawa, Ill. 61350.



the support elements, enclosure, and hopper may be varied according to the user's needs.

## 7. Specimen Preparation and Sampling

7.1 *Materials*—It is the intent of this practice to allow for the abrasion testing of any material form, including wrought metals, castings, forgings, gas or electric weld overlays, plasma spray deposits, powder metals, metallizing, electroplates, cermets, ceramics etc. The type of material will, to some extent, determine the overall size of the test specimen.

7.2 *A Typical Specimen* is a rectangular shape 25 by 76 mm (1.0 by 3.0 in.) and between 3.2 and 12.7 mm (0.12 and 0.50 in.) thick. The size may be varied according to the user's need with the restriction that the length and width be sufficient to show the full length of the wear scar as developed by the test. The test surface should be flat within 0.125 mm (0.005 in.) maximum.

7.3 *Wrought, Cast, and Forged Metal*—Specimens may be machined to size directly from the raw material.

7.4 *Electric or Gas Weld Deposits* are applied to one flat surface of the test piece. Double-weld passes are recommended to prevent weld dilution by the base metal. The heat of welding may distort the test specimen. When this occurs, the specimen may be mechanically straightened or ground or both. In order to develop a suitable wear scar, the surface to be abraded must be ground flat to produce a smooth, level surface at least 63.4 mm (2.50 in.) long and 19.1 mm (0.75 in.) for the test. (See 7.5.) Note that the welder technique, heat input of welds, and the flame adjustment of gas welds will have an effect on the abrasion resistance of a weld deposit.

7.5 *Finish*—Test specimens should be smooth, flat, and free of scale. Surface defects such as porosity and roughness may bias the test results, and such specimens should be avoided unless the surface itself is under investigation. Typical suitable surfaces are mill-rolled surfaces such as are present on cold-rolled steel, electroplated and similar deposits, ground surfaces, and finely machined or milled surfaces. A ground surface finish of approximately  $0.8 \mu\text{m}$  ( $32 \mu\text{in.}$ ) or less is acceptable. The type of surface or surface preparation shall be stated in the data sheet.

## 8. Test Parameters

8.1 Table 2 indicates the force applied against the test specimen and the number of wheel revolutions for test Procedures A through D.

8.2 *Sand Flow*—The rate of sand flow shall be 250 to 350 g/min (0.55 to 0.75 lb/min).

8.3 *Time*—The time of the test will be about 30 min for Procedures A and D, 10 min for Procedure B, and 30 s for Procedure C, depending upon the actual wheel speed. In all cases the number of wheel revolutions and not the time shall be the controlling parameter.

8.4 *Lineal Abrasion*—Table 2 shows the lineal distance of scratching abrasion developed using a 228.6-mm (9-in.) diameter wheel rotating for the specified number of revolutions. As the rubber wheel reduces in diameter the number of wheel revolutions shall be adjusted to equal the sliding distance of a new wheel (Table 2) or the reduced abrasion rate shall be taken into account by adjusting the volume loss produced by the worn wheel to the normalized volume loss of a new wheel. (See 10.2.)

## 9. Procedure

9.1 *Cleaning*—Immediately prior to weighing, clean the specimen with a solvent or cleaner and dry. Take care to remove all dirt or foreign matter or both from the specimen. Dry materials with open grains (some powder metals or ceramics) to remove all traces of the cleaning solvent, which may have been entrapped in the material. Steel specimens having residual magnetism should be demagnetized or not used.

9.2 Weigh the specimen to the nearest 0.001 g (0.0001 g for Procedure C).

9.3 Seat the specimen securely in the holder and add the proper weights to the lever arm to develop the proper force pressing the specimen against the wheel. This may be measured accurately by means of a spring scale which is hooked around the specimen and pulled back to lift the specimen away from the wheel. A wedge should be placed under the lever arm so that the specimen is held away from the wheel prior to start of test. (See Fig. 2.)

9.4 Set the revolution counter to the prescribed number of wheel revolutions.

9.5 Start the sand flow which should have been preset to between 250 and 350 g/min (0.45



and 0.77 lb/min). Do not start the wheel rotation until the proper uniform curtain of sand has been established.

9.6 Start the wheel rotation and immediately lower the lever arm carefully to allow the specimen to contact the wheel.

9.7 When the test has run the desired number of wheel revolutions, lift the specimen away from the wheel and stop the sand flow and wheel rotation. The sand flow rate should be measured before and after a test, unless a consistent flow rate has been established.

9.8 Remove the specimen and reweigh to the nearest 0.001 g (0.0001 g for Procedure C).

9.9 *Preparation and Care of Rubber Wheels*—Dress the periphery of all new rubber wheels and make concentric to the bore of the steel disk upon which the rubber is mounted. The concentricity of the rim shall be within 0.05 mm (0.002 in.) total indicator reading on the diameter. Follow the same dressing procedure on used wheels that develop grooves or that wear unevenly so as to develop trapezoidal or uneven wear scars on the test specimen (Fig. 11). The intent is to produce a uniform surface that will run tangent to the test specimen without causing vibration or hopping of the lever arm. The wear scars shall be rectangular in shape and of uniform depth at any section across the width. The rubber wheel may be used until the diameter wears to 315.9 mm (8.50 in.). New rubber rims may be mounted on steel disks by the qualified source (6.2.).

9.10 *Wheel Dressing Procedure*—The preferred dressing procedure for the periphery of the rubber rim is to mount the wheel on a lathe, and machine the surface with a tool bit especially ground for rubber applications. Grind a carbide or high-speed steel tool bit to very deep rake angles (Fig. 12). Feed the tool across the rubber surface in the opposite direction from that normally used for machining steel. This allows the angular surface of the tool bit to shear away thin layers of rubber without tearing or forming grooves in the rubber as would occur when using the pointed edges of the tool. The recommended machining parameters are: *Feed*—25 mm/min (1.0 in./min); *Speed*—200 rpm; *Depth of Cut*—0.254 mm (0.010 in.) to 0.762 mm (0.030 in.). The dressed wheel should be first used on a soft carbon steel test specimen (AISI 1020 or equivalent) using Procedure A. This results in a smooth, uniform-non-sticky

surface. An alternative dressing method involves the use of a high-speed grinder on the tool post of a lathe. Take great care since grinding often tends to overheat and smear the rubber, leaving a sticky surface. Such a surface will pick up and hold sand particles during testing. If the grinding method is used, not more than 0.05 mm (0.002 in.) may be ground from the surface at one time so as to prevent overheating.

## 10. Calculating and Reporting Results

10.1 The abrasion test results should be reported as volume loss in cubic millimetres in accordance with the specified procedure used in the test. For example,  $\text{---mm}^3$  per ASTM Procedure  $\text{---}$ . While mass loss results may be used internally in test laboratories to compare materials of equivalent densities, it is essential that all users of this test procedure report their results uniformly as volume loss in publications or reports so that there is no confusion caused by variations in density. Convert mass loss to volume loss as follows:

$$\text{Volume loss, mm}^3 = \frac{\text{mass loss (g)}}{\text{density (g/cm}^3\text{)}} \times 1000$$

10.2 *Adjusting the Volume Loss*—As the rubber wheel decreases in diameter the amount of scratching abrasion developed in a given practice will be reduced accordingly. The actual volume loss produced by these slightly smaller wheels will, therefore, be inaccurate. The “adjusted volume loss” value takes this into account and indicates the actual abrasion rate that would be produced by a 228.6-mm (9.00-in.) diameter wheel. Calculate the adjusted volume loss (AVL) as follows:

$$\text{AVL} = \text{measured volume loss} \times \frac{228.6 \text{ mm (9.00 in.)}}{\text{wheel diameter after use}}$$

10.3 *Reporting Test Results*—All significant test parameters and test data as noted in Tables 2 and 3 shall be reported. Any variation from the recommended procedure must be noted in the comments. The report shall include a statement of the current precision and accuracy of the test apparatus as qualified by the testing of Reference Materials (11.6).

## 11. Precision and Accuracy

11.1 The precision and accuracy of the measurements obtained with this test procedure will



depend upon strict adherence to the stated test parameters and maintenance of the proper sand flow rate and sand curtain throughout the duration of the test.

11.2 The degree of agreement in repeated tests on the same material will depend upon material homogeneity, machine and material interaction, and close observation of the test by a competent machine operator.

11.3 Normal variations in the abrasive, rubber wheel characteristics, and procedure will tend to reduce the accuracy of the practice as compared to the accuracy of such material property tests as hardness or density. Properly conducted tests will, however, maintain a 5% or less coefficient of variation of volume loss values which will characterize the abrasive resistance of materials (see Appendix X1).

11.4 *Initial Machine Operation and Qualification*—The number of tests to establish precision and accuracy of the apparatus for initial machine operation shall be at least five. After initial qualification, a minimum of three tests may be used to periodically monitor precision and accuracy. These tests shall be made, using Reference Materials (11.6) and the statistical calculations made, using formulas described in Appendix X1.4.

11.4.1 The standard deviation from the mean average shall be calculated from the accumulated test results and reduced to the coefficient of variation in accordance with Appendix X1. The coefficient of variation shall not exceed 7% in materials of the 20 to 60-mm<sup>3</sup> volume loss range. If this value is exceeded, the machine operation shall be considered out of control and steps taken to eliminate erratic results.

11.4.2 In any test series all data must be considered in the calculation including outliers (data exceeding the obvious range). For example an exceedingly high or low volume loss must not be disregarded except in the case of observed faulty machine operation.

11.5 While two or more laboratories may develop test data that is within the acceptable

coefficient of variation for their own individual test apparatus, their actual averages may be relatively far apart. The selection of sample size and the method for establishing the significance of the difference in averages shall be agreed upon between laboratories and shall be based on established statistical methods E 122, E 177, and ASTM STP 15D.

11.6 *Reference Materials*—Reference materials<sup>12</sup> may be used for periodic monitoring of the test apparatus and procedures in individual laboratories.

11.6.1 While any of the four test procedures (Table 2) may be used on reference materials, it is recommended that Procedure A be used for the more abrasion-resistant materials such as AISI D-2 Tool Steel. When Procedure A volume loss values exceed 100 mm<sup>3</sup> in materials such as annealed low-carbon steel, greater accuracy in material ranking can be obtained by using Procedures B or D.

11.6.2 *Reference Specimens:*

AISI D-2 Tool Steel (Nonfree Machining Type)

Harden 1010°C (1850°F)—Air Quench to Room Temperature

Temper—205°C (400°F)—One Hour at Temperature—Air Cool

Hardness 59–60 HRC, Volume Loss Procedure A,  $36 \pm 3$  mm<sup>3</sup><sup>13</sup>

11.6.3 Volume loss values for reference materials are developed in round-robin testing by the Abrasive Wear Task Group of ASTM Subcommittee G02.30. This information is on file at ASTM Headquarters. (See Appendix X1.6 for typical volume loss values of other materials.) It is the intent of Subcommittee G02.30 to develop several reference materials for abrasive wear testing.

<sup>12</sup> Contact the Office of Standard Reference Materials, National Bureau of Standards, Washington, D.C. 20234, or ASTM Headquarters.

<sup>13</sup> Volume loss ranges of specific heats of reference materials are developed in round robin tests conducted by Committee G02.30. This information is available from ASTM Headquarters. (See also Appendix X1.6.)

## REFERENCES

- (1) Avery, H. S., "The Nature of Abrasive Wear," *SAE Preprint 750822*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1975.
- (2) Tucker, R. C., and Miller, A. E., *Low Stress*

*Abrasive and Adhesive Wear Testing, ASTM STP 615*, Philadelphia, Pa., 1975, pp. 68–90.

- (3) Avery, H. S., "The Measurement of Wear Resistance," *Wear*, Vol 4, No. 6, November/De-



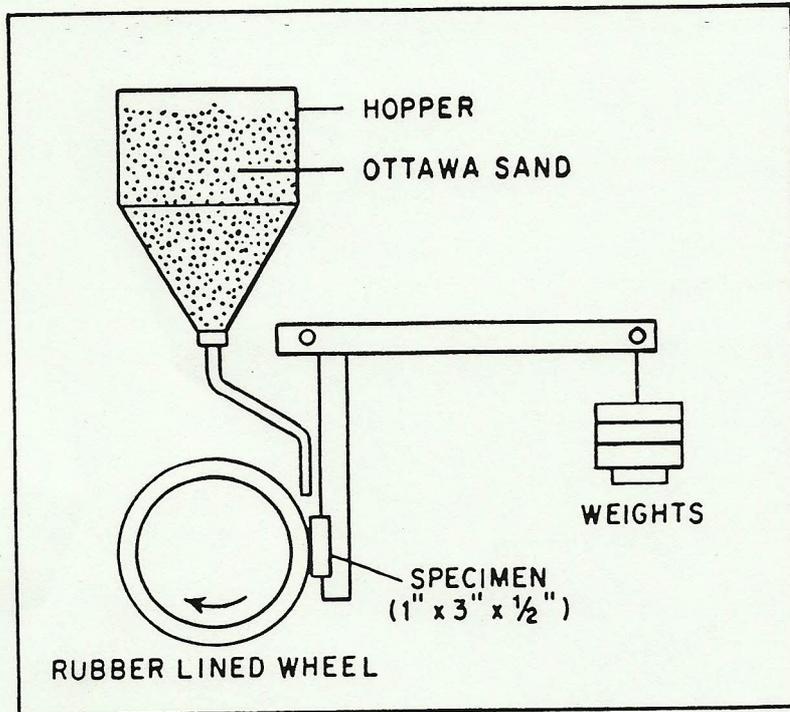


FIG. 1 Schematic Diagram of Test Apparatus

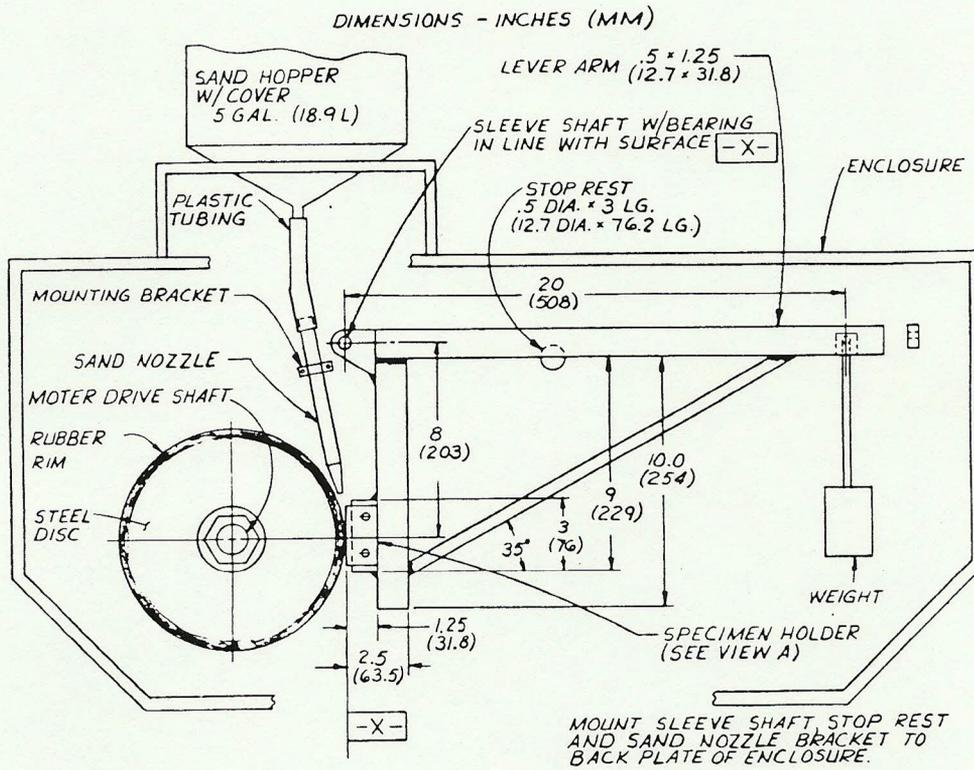
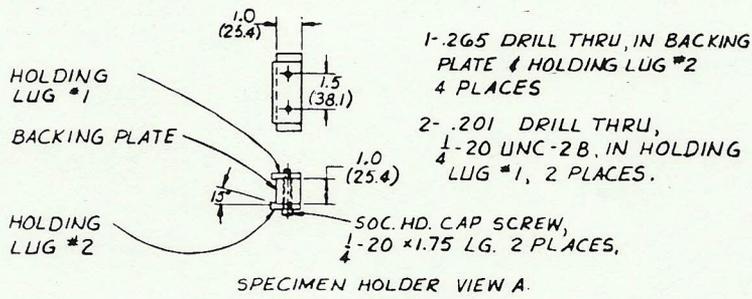


FIG. 2 Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test Apparatus

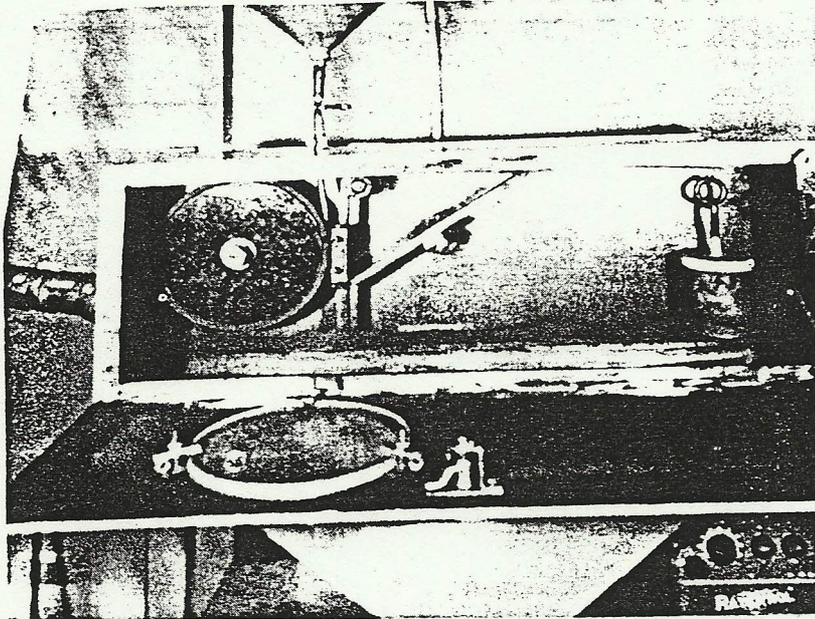


FIG. 3 Wheel and Lever Arm

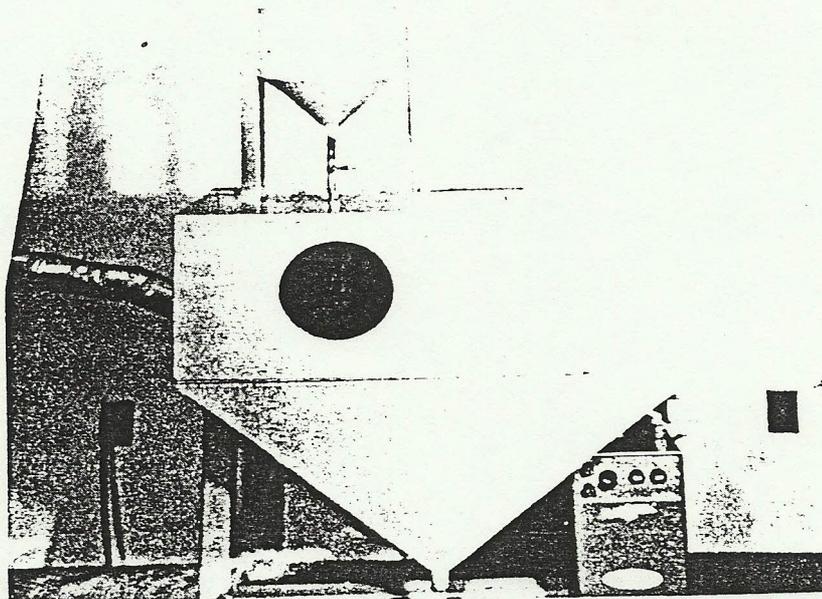


FIG. 4 Enclosure Frame

ASTM G 65

Dimensions - mm (inches)

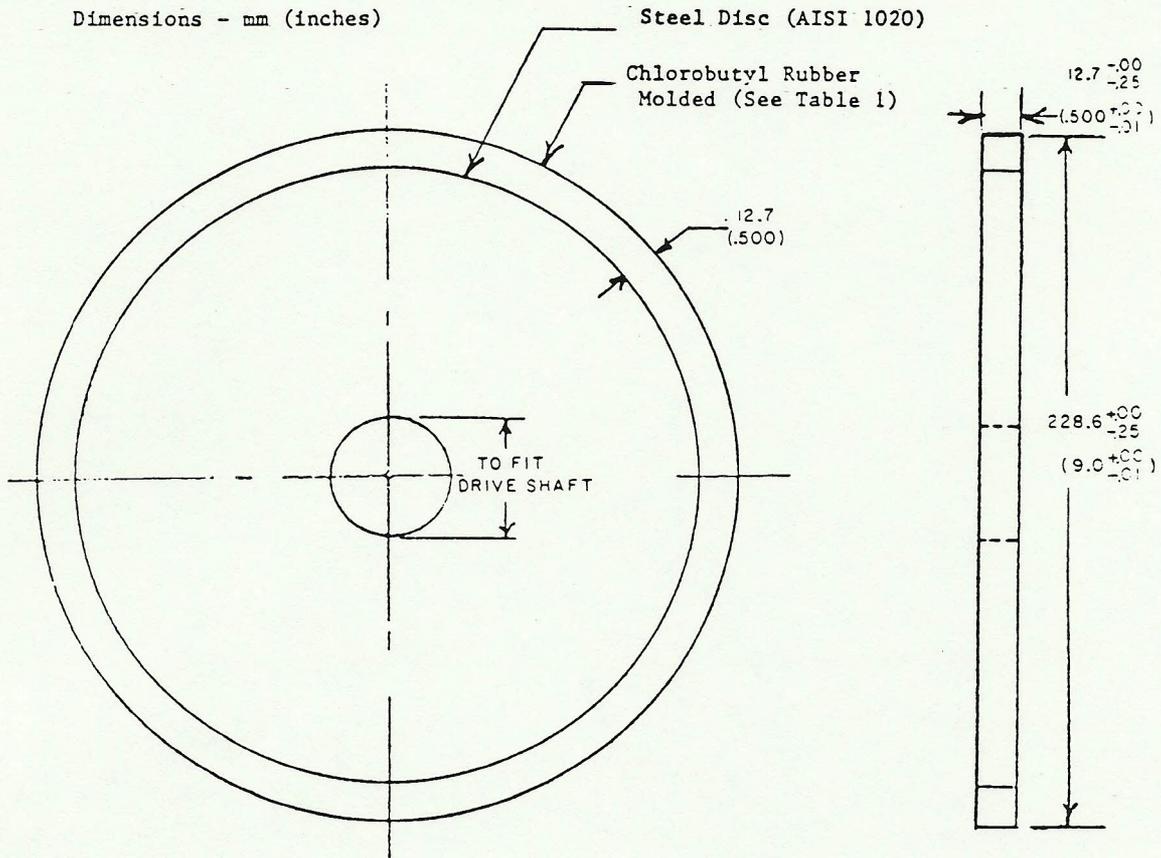
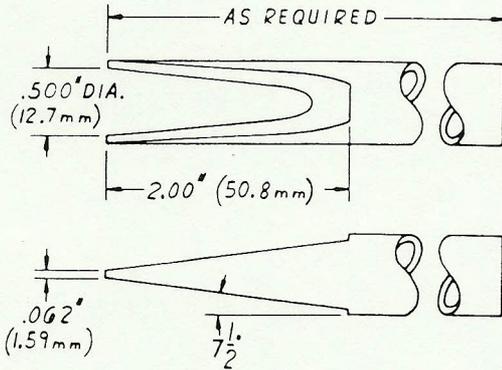


FIG. 5 Rubber Wheel

FABRICATED SAND NOZZLE

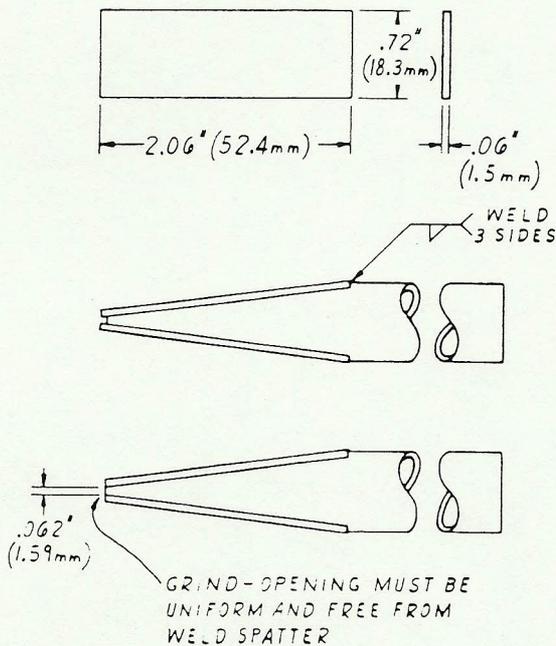
ITEM ① 1 REQUIRED



- 1- 3/8" SCHEDULE 40 STAINLESS PIPE OR METRIC EQUIVALENT.  
O.D. - 0.675" (17.0 mm)  
I.D. - 0.493" (12.4 mm)  
CUT TO LENGTH AS REQUIRED
- 2- MACHINE I.D. TO 0.500" (12.7 mm)

- 3- MILL 7-1/2° TAPER ON O.D. TO OBTAIN FLAT SURFACE LEAVING A BUTT EDGE 2.00" (50.8 mm) FROM BEGINNING OF TAPER

ITEM ② 2 REQUIRED



- 4- STAINLESS STEEL STRIP 16 GAGE OR METRIC EQUIVALENT. THICKNESS 0.063" (1.59 mm) MACHINE TO SIZE AND FLATTEN

- 5- WELD FLAT SECTION OF (ITEM 2) TO TAPERED SURFACES OF (ITEM 1)
- 6- GRIND END OF NOZZLE TO OBTAIN 0.062 (1.59 mm) WIDTH OF SLOT.

- 7- DETERMINE FLOW RATE OF NOZZLE USING AFS 50/70 TEST SAND (250 TO 350 g/MIN)
- 8- TO INCREASE FLOW RATE GRIND BACK NOZZLE END IN 0.004" (0.10 mm) INCREMENTS.

FIG. 6 Sand Nozzle

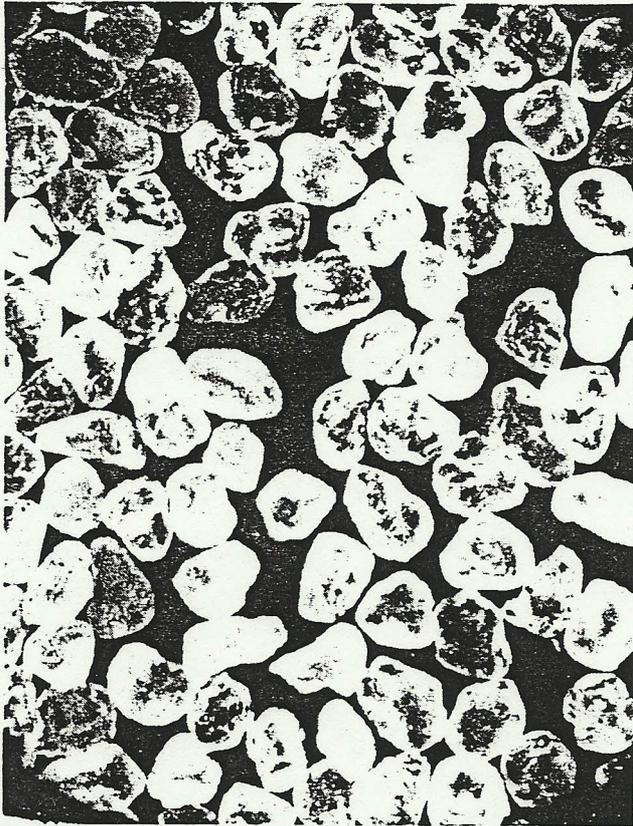


FIG. 7 25X Magnification AFS 50/70 Test Sand Ottawa Silica Co.



FIG. 8 Position of Sand Nozzle

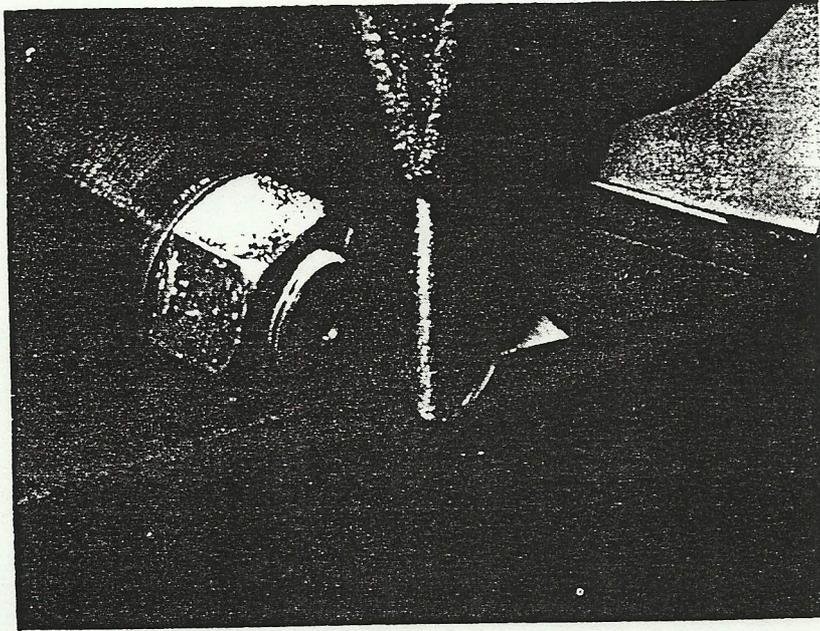


FIG. 9 Sand Flow—Streamlined

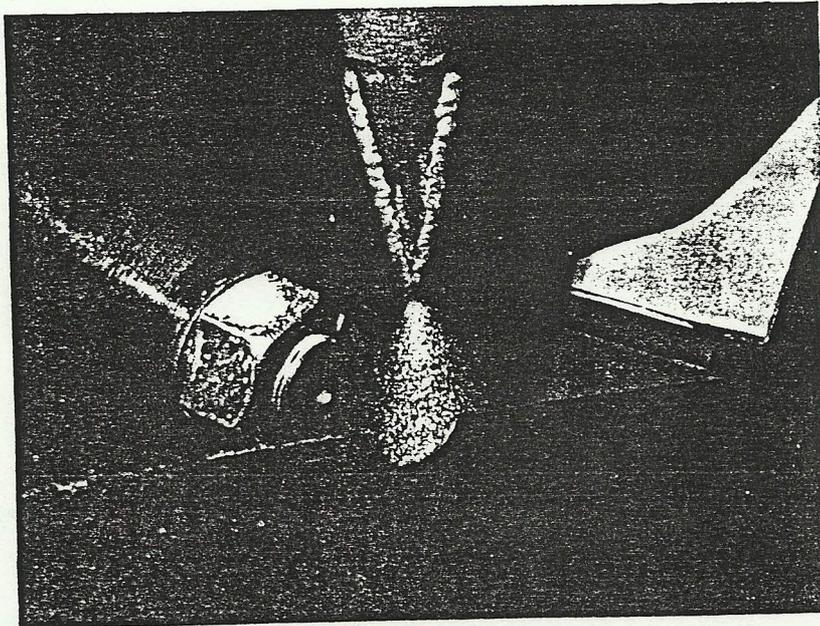


FIG. 10 Sand Flow—Turbulence

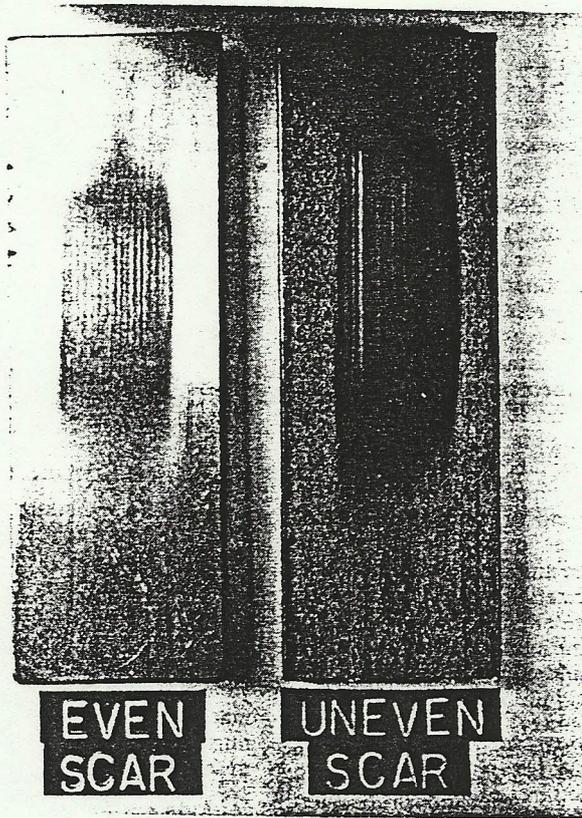


FIG. 11 Typical Wear Scars Uneven and Nonuniform Wear Scars Indicate Improper Alignment or Wear of Rubber Wheel.

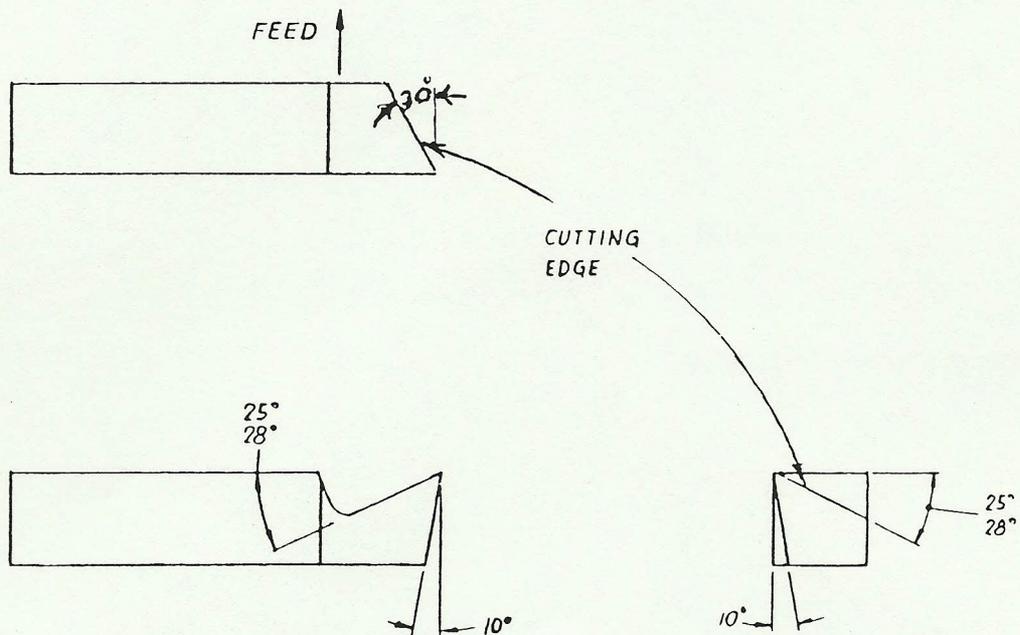


FIG. 12 Typical Wheel Dressing Tool

**APPENDIX**

**XI. SOME STATISTICAL CONSIDERATIONS IN ABRASION TESTING**

**X1.1 Background**

X1.1.1 The Dry Sand/Rubber and Wheel Abrasion Test as developed and described by Haworth, Avery, and others (1) through (7) has been in various stages of evolution and use over the last two or more decades. A number of variations of this test procedure have been used by several research and industrial laboratories in the U.S. who were faced with the problem of evaluating hard surfacing alloys, castings, and wrought products for their resistance to abrasive wear. Individual laboratories set their own test parameters with the goal being the generation of reproducible test data within the laboratory. As the need for standardization became apparent, Subcommittee G02.30 formed a task group to study the effect of each test parameter on the overall results within individual laboratories and among all laboratories as a group. While standardization of test parameters was attained, it became evident that the variability or experimental error inherent in each laboratory was a factor that must be considered. Not only must the test method, apparatus, and individual operator generate correct results (accuracy) but the test results must be consistently reproducible (precision) within an acceptable narrow range. Another important consideration in developing accurate and precise test results was the selection of adequate sample size. More specifically this was the need for laboratories to agree on the number of times a test should be repeated on a given homogeneous material in order to obtain a meaningful average result. While single test results and simple arithmetic averaging may in some few cases be useful in individual laboratories, it is essential that statistical techniques and multiple testing of specimens be utilized for the qualification of each test apparatus, and for the comparison of materials. Further information on statistical methods may be found in Recommended Practice E 122, STP 150, and in the references.

**X1.2 Statistical Formulas**

X1.2.1 Several formulas for the calculation of optimum sample size, standard deviation, and coefficient of variation are used in the statistical analysis of data. To ensure uniformity among laboratories using the Dry Sand/Rubber Wheel Test, the standard deviation and coefficient of variation of results produced from a series of tests shall be calculated by the following formulas:

$$s = \text{standard deviation} \tag{1}$$

$$(\text{small sample size, 2 to 10}) = R/d_2$$

$$s = \text{standard deviation (any sample size)} \tag{2}$$

$$= \sqrt{\sum(x - \bar{x})^2/n - 1}$$

$$V = \% \text{ coefficient of variation} = (s/\bar{x}) \times 100 \tag{3}$$

$$n = \text{sample size (95 \% confidence level)} \tag{4}$$

$$= (1.96 V/e)^2$$

where:

- $s$  = standard deviation from the mean,
- $V$  = variability of the test procedure, %,
- $x$  = value of each test result (volume loss in mm<sup>3</sup>),
- $\bar{x}$  = mean or arithmetic average for  $n$  tests,
- $\sum x$  = sum total of all test values,
- $n$  = number of tests or observations,
- $e$  = allowable sampling error, %,
- $R$  = difference between the highest and lowest test value, and
- $d_2$  = deviation factor, which varies with sample size (see Table X1.1).

**X1.3 Use of Statistical Methods**

X1.3.1 In evaluating the precision and accuracy of any test procedure, new users must deal with the concepts of mean averages, standard deviation from the mean, variability of test results, range of results, allowable sampling error, and particularly the effect of sample size. While it is obvious that a large number of tests on the same material is desirable and will yield a high confidence level in evaluating test results, many abrasion test evaluations are made on a small number of samples. This is due to the fact that in much abrasion work, large number of test specimens are just not available. In addition to this a new user is concerned with evaluating the accuracy of his first few (2 or 3) test results during the initial test campaign which certainly should not inspire much confidence because of the small number of tests. However, even with this admittedly small sample size the user may calculate the variability of results, which may give a general indication of precision of the apparatus and test method (see X1.4). As more data are accumulated from the same homogeneous material and new data are accumulated from different materials, the accumulated variability values may be averaged to provide a better estimate of the precision of the apparatus and procedure.

**X1.4 Small Sample Size (2 to 10)**

X1.4.1 In statistical analysis the estimated standard deviations of large sample sizes (over 10) are derived from the square root of the mean square of deviations from the average. A typical user of this test procedure will more likely start out with less than 10 test results. In these cases the standard deviation ( $s$ ) is more efficiently derived from the range ( $R$ ) of the sample observation than from the root mean square. For such samples the standard deviation is obtained by multiplying the range of available observations (the difference between the highest and the lowest numerical value) by a deviation factor (Formula 1) that varies with the sample size. Once the standard deviation is obtained, the percent coefficient of variation is attained by dividing the standard deviation by the average test value  $\bar{x}$  and multiplying by 100. The deviation factor is obtained from Table X1.1.

X1.4.2 *Example 1*—This example shows a typical analysis for standard deviation and coefficient of variation of three abrasion tests (Procedure A) made upon hardened tool steel. These data as well as subsequent data shown in other examples are taken from actual round-robin test data obtained in the early stages of the standardization of the test procedure.

Number of tests ( $n$ )  
 = 3  
 Volume loss data ( $x$ )  
 = 44.6 mm<sup>3</sup>, 39.9 mm<sup>3</sup>, 32.6 mm<sup>3</sup>  
 Average of volume loss ( $\bar{x}$ )  
 = 39.03  
 Range of test  
 = 12.0  
 Standard deviation ( $S$ )  
 =  $R/d_2 = 12/1.693 = 7.09$  (1)  
 Coefficient of variation ( $v$ )  
 =  $(s/\bar{x}) \times 100$   
 =  $(7.09/39.03) \times 100 = 18.17\%$  (3)

Note that the 18.17 % variation is well above the acceptable 7 % maximum as indicated in 11.3.1 of the standard. It is obvious that this particular test apparatus or procedure was out of control. The cause was found to be inconsistent sand flow rates which were corrected in subsequent tests.

**X1.5 Large Sample Size (10 or over)**

X1.5.1 *Example 2*—This example shows the analysis for the coefficient of variation of ten abrasion tests (Procedure A) made upon hardened D-2 tool steel. The standard deviation was calculated from Formula 1 and the test data were set down in the following format:

Test Number	$x$	$x - \bar{x}$	$(x - \bar{x})^2$
1	40.8	1.74	7.5076
2	36.9	-1.16	1.3455
3	38.5	0.44	0.1936
4	39.4	1.34	1.7956
5	38.2	0.14	0.0196
6	36.4	-1.66	2.7556
7	41.3	3.24	10.4976
8	35.8	-2.26	5.1076
9	36.9	-1.15	1.3456
10	36.4	-1.66	2.7556
	$\bar{x} = 38.06$		$33.3239 = (x - \bar{x})^2$

$s = \sqrt{\sum(x - \bar{x})^2/n - 1} = 33.3239/9 = 1.924$  (2)  
 $V = (s/\bar{x}) \cdot 100 = (1.92/38.06) 100 = 5.06\%$

In this particular test series the 5.06 % coefficient of variation indicated the test procedure was under satisfactory control. Subsequent modification of the sand nozzle to develop more uniform sand flow resulted in even greater precision.

X1.5.2 *Example 3*—In still another test series one apparatus developed very precise results with a coefficient of variation of 4.3 %, which is well within the acceptable value. This indicated that the apparatus was producing consistent results. The volume loss values, however, were not accurate and were significantly below the volume loss limits for hardened D-2 tool steel as shown in Table X1.3 of the test method (34 ± 3 mm<sup>3</sup>). The cause was found to be in the design of the sand nozzle and was corrected by fabricating a nozzle with accurate dimensions and streamlined sand flow.

**X1.6 Estimated Sample Size and Allowable Sampling Error**

X1.6.1 As indicated previously the availability of multiple test specimens in abrasion testing is sometimes limited. When this occurs the user must have some criterion upon which to judge the minimum acceptable sample size for meaningful results. Recommended practice E 122 describes the choice of sample size to estimate the average quality of a lot or process. The following formula takes into account the allowable sampling error and the inherent variability or experimental error of the test method (coefficient of variation).

$n = (1.96 v/e)^2$  (4)

Table X1.2 is based upon this formula. It indicates a 5 % probability that the difference between the sample estimate of the mean value  $\bar{x}$ , and that obtainable from averaging all values from a very high number of tests, will exceed the allowable sampling error ( $e$ ). This corresponds to a 95 % confidence level which is an appropriate criterion for abrasion tests. For example, if the coefficient of variation of the test apparatus as determined by multiple testing is 7 %, the minimum sample size would be 8 in order to obtain a 5 % allowable sampling error. Note, however, that if the test results for the 8 samples does not generate a coefficient of variation of 7 % or less the test is not valid and corrective action must be taken.

**X1.7 Typical Volume Loss Values**

X1.7.1 Procedure A of the Dry Sand/Rubber Wheel Test will produce volume losses in metallic materials ranging from 0.25 to 250 mm<sup>3</sup>. The more abrasion-resistant materials will develop the least volume loss. Table X1.3 shows typical volume loss ranges that may be expected in the metals listed. They are offered as guidelines only and not as purchasing specifications or as standard reference specimens. Any material specifications involving this test method must be by agreement between the seller and the purchaser. When volume losses exceed 100 mm<sup>3</sup>, greater accuracy in material ranking is obtained by using Procedure D (see Table 2). Procedure A should be used for the more abrasion-resistant materials.

TABLE X1.1 Factors for Estimating Standard Deviation from the Range on the Basis of Sample Size

Sample Size (n)	$d_2$	$1/d_2$
2	1.128	0.8865
3	1.693	0.5907
4	2.059	0.4857
5	2.326	0.4299
6	2.534	0.3946
7	2.704	0.3698
8	2.847	0.3512
9	2.970	0.3367
10	3.078	0.3249

TABLE X1.3 Typical Volume Loss Ranges

Material	Procedure A, mm <sup>3</sup>	Procedure D, mm <sup>3</sup>
1. 316 stainless steel bar-annealed-Rb-80	260 ± 20	75 ± 8
2. AISI 1090 steel plate-normalized 900°C (1650°F) air cooled-24-26 HRC	80 ± 8	29 ± 4
3. 17-4PH stainless-aged 500°C (925°F)-4 h at temperature, air-cooled-43 HRC	225 ± 20	66 ± 5
4. AISI D2 tool steel-hardened 1010°C (1850°F) air-cooled, tempered-205°C (400°F)-1 h air-cooled 59-60 HRC	36 ± 3	...
5. Stellite 1016 hard surfacing overlay-57-58 HRC applied by oxyacetylene welding process (3S flame)	21 ± 4	...
6. Sintered tungsten carbide-(Kennametal K-714, Valenite 2889)	1.5 ± 1	...

TABLE X1.2 Minimum Acceptable Sample Size (n) for 95% Confidence

v	Allowable Sampling Error (e)								
	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%	10%
Coefficient of Variation, %									
1	4	1	...	...	...	...	...	...	...
2	16	4	2	1	...	...	...	...	...
3	35	9	4	3	2	1	...	...	...
4	62	16	7	4	3	2	2	...	...
5	96	24	11	6	4	3	2	2	1
6	...	35	16	9	6	4	3	2	2
7	...	47	21	12	8	6	4	3	2
8	...	62	28	16	10	7	5	4	3
9	...	78	35	20	13	9	7	5	4
10	...	96	43	24	16	11	8	6	4

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

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, Pa. 19103, which will schedule a further hearing regarding your comments. Failing satisfaction there, you may appeal to the ASTM Board of Directors.



## Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation G 65; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This test method covers laboratory procedures for determining the resistance of metallic materials to scratching abrasion by means of the dry sand/rubber wheel test. It is the intent of this test method to produce data that will reproducibly rank materials in their resistance to scratching abrasion under a specified set of conditions.

1.2 Abrasion test results are reported as volume loss in cubic millimetres for the particular test procedure specified. Materials of higher abrasion resistance will have a lower volume loss.

NOTE 1—In order to attain uniformity among laboratories, it is the intent of this test method to require that volume loss due to abrasion be reported only in the metric system as cubic millimetres.  $1 \text{ mm}^3 = 6.102 \times 10^{-5} \text{ in}^3$ .

1.3 This test method covers four recommended procedures which are appropriate for specific degrees of wear resistance or thicknesses of the test material.

1.3.1 *Procedure A*—This is a relatively severe test which will rank metallic materials on a wide volume loss scale from low to extreme abrasion resistance. It is particularly useful in ranking materials of medium to extreme abrasion resistance.

1.3.2 *Procedure B*—A short-term variation of Procedure A. It may be used for highly abrasive resistant materials but is particularly useful in the ranking of medium- and low-abrasive-resistant materials. Procedure B should be used when the volume-loss values developed by Procedure A exceeds  $100 \text{ mm}^3$ .

1.3.3 *Procedure C*—A short-term variation of Procedure A for use on thin coatings.

1.3.4 *Procedure D*—This is a lighter load variation of Procedure A which is particularly useful in ranking materials of low-abrasion resistance. It is also used in ranking materials of a specific generic type or materials which would be very close in the volume loss rates as developed by Procedure A.

1.3.5 *Procedure E*—A short-term variation of Procedure B that is useful in the ranking of materials with medium- or low-abrasion resistance.

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

### 2. Referenced Documents

#### 2.1 *ASTM Standards:*

D 2240 Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness<sup>2</sup>

E 11 Specification for Wire-Cloth Sieves for Testing Purposes<sup>3</sup>

E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process<sup>3</sup>

E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods<sup>3</sup>

G 40 Terminology Relating to Wear and Erosion<sup>4</sup>

#### 2.2 *American Foundrymen's Society Standards:*

AFS Foundry Sand Handbook, 7th Edition<sup>5</sup>

### 3. Terminology

#### 3.1 *Definition:*

3.1.1 *abrasive wear*—wear due to hard particles or hard protuberances forced against and moving along a solid surface (Terminology G 40).

NOTE 2—This definition covers several different wear modes or mechanisms that fall under the abrasive wear category. These modes may degrade a surface by scratching, cutting, deformation, or gouging (1 and 6).<sup>6</sup>

### 4. Summary of Test Method

4.1 The dry sand/rubber wheel abrasion test (Fig. 1) involves the abrading of a standard test specimen with a grit of controlled size and composition. The abrasive is introduced between the test specimen and a rotating wheel with a chlorobutyl rubber tire or rim of a specified hardness. This test specimen is pressed against the rotating wheel at a specified force by means of a lever arm while a controlled flow of grit abrades the test surface. The rotation of the wheel is such that its contact face moves in the direction of the sand flow. Note that the pivot axis of the lever arm lies within a plane which is approximately tangent to the rubber wheel surface, and normal to the horizontal diameter along which the load is applied. The test duration and force applied by the lever arm is varied as noted in Procedure A through D. Specimens are weighed before and after the test and the loss in mass recorded. It is necessary to convert the mass loss to volume loss in cubic millimetres, due to the wide differences in the

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 09.01.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.02.

<sup>5</sup> Available from American Foundrymen's Society, Golf and Wolf Roads, Des Plaines, IL 60016.

<sup>6</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this test method.

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G-2 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.30 on Abrasive Wear.

Current edition approved July 15, 1994. Published September 1994. Originally published as G 65 - 80. Last previous edition G 65 - 91.

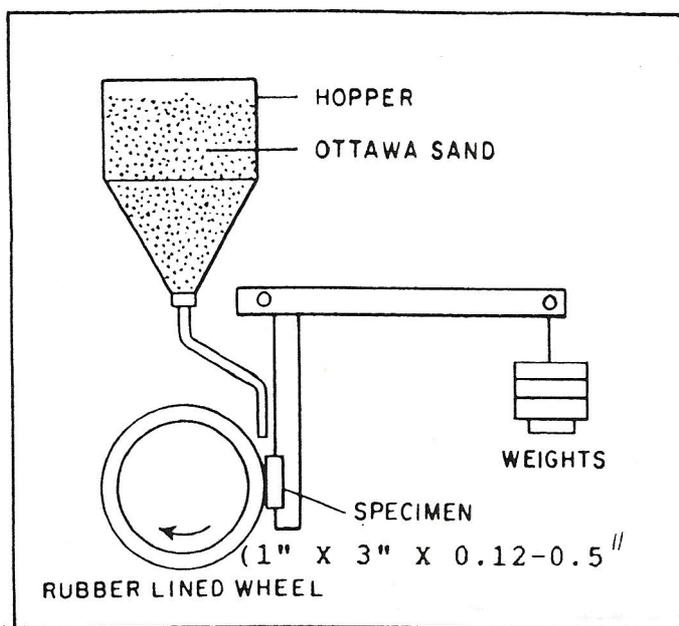


FIG. 1 Schematic Diagram of Test Apparatus

density of materials. Abrasion is reported as volume loss per specified procedure.

### 5. Significance and Use (1 through 7)

5.1 The severity of abrasive wear in any system will depend upon the abrasive particle size, shape, and hardness, the magnitude of the stress imposed by the particle, and the frequency of contact of the abrasive particle. In this practice these conditions are standardized to develop a uniform condition of wear which has been referred to as scratching abrasion (1 and 2). The value of the practice lies in predicting the relative ranking of various materials of construction in an abrasive environment. Since the practice does not attempt to duplicate all of the process conditions (abrasive size, shape, pressure, impact, or corrosive elements), it should not be used to predict the exact resistance of a given material in a specific environment. Its value lies in predicting the ranking of materials in a similar relative order of merit as would occur in an abrasive environment. Volume loss data obtained from test materials whose lives are unknown in a specific abrasive environment may, however, be compared with test data obtained from a material whose life is known in the same environment. The comparison will provide a general indication of the worth of the unknown materials if abrasion is the predominant factor causing deterioration of the materials.

### 6. Apparatus and Material<sup>7</sup>

6.1 Figure 2 shows a typical design and Figs. 3 and 4 are photographs of the test apparatus which may be constructed from readily available materials. Also, see Ref (2). Several elements are of critical importance to ensure uniformity in test results among laboratories. These are the type of rubber

used on the wheel, the type of abrasive and the shape, positioning and the size opening of the sand nozzle, and a suitable lever arm system to apply the required force.

6.2 *Rubber Wheel*—The wheel shown in Fig. 5 shall consist of a steel disk with an outer layer of chlorobutyl rubber molded to its periphery. Uncured rubber shall be bonded to the rim and fully cured in a steel mold. The optimum hardness of the cured rubber is Durometer A-60. A range from A 58 to 62 is acceptable. At least four hardness readings shall be taken on the rubber approximately 90° apart around the periphery of the wheel using a Shore A Durometer tester in accordance with Test Method D 2240. The gage readings shall be taken after a dwell time of 5 s. The recommended composition of the rubber and a qualified molding source is noted in Table 1. (See 9.9 for preparation and care of the rubber wheel before and after use and see Figs. 2 and 5.)

6.3 *Abrasive*—The type of abrasive shall be a rounded quartz grain sand as typified by AFS 50/70 Test Sand (Fig. 7).<sup>8</sup> The moisture content shall not exceed 0.5 weight %. Sand that has been subjected to dampness or to continued high relative humidity may take on moisture, which will affect test results. Moisture content may be determined by measuring the weight loss after heating a sample to approximately 120°C (250°F) for 1 h minimum. If test sand contains moisture in excess of 0.5 % it shall be dried by heating to 100°C (212°F) for 1 h minimum and the moisture test repeated. In high-humidity areas sand may be effectively stored in constant temperature and humidity rooms or in an enclosed steel storage bin equipped with a 100-W electric bulb. Welding electrode drying ovens, available from welding equipment suppliers are also suitable. Multiple use of the sand may affect test results and is not recommended. AFS 50-70 Test Sand is controlled to the following size range using U.S. sieves (Specification E 11).

U.S. Sieve Size	Sieve Opening	% Retained on Sieve
40	425 μm (0.0165 in.)	none
50	300 μm (0.0117 in.)	5 max
70	212 μm (0.0083 in.)	95 min
100	150 μm (0.0059 in.)	none passing

6.4 *Sand Nozzle*—Figure 6 shows the fabricated nozzle design which was developed to produce an accurate sand flow rate and proper shape of sand curtain for test procedures. The nozzle may be of any convenient length that will allow for connection to the sand hopper using plastic tubing. In new nozzles, the rate of sand flow is adjusted by grinding the orifice of the nozzle to increase the width of the opening to develop a sand flow rate of 300 to 400 g/min. During use, the nozzle opening must be positioned as close to the junction of the test specimen and the rubber wheel as the design will allow. (See Fig. 8.)

6.4.1 Any convenient material of construction that is available as welded or seamless pipe may be used for the construction of the fabricated nozzle. Stainless steel is preferred because of its corrosion resistance and ease of welding. Copper and steel are also used successfully.

6.4.2 *Formed Nozzle*—Nozzles formed from tubing may be used only when they duplicate the size and shape (rectan-

<sup>7</sup> Original users of this test method fabricated their own apparatus. Commercially available machines are available from the following manufacturers of abrasion testing equipment: Falx Corp., 2055 Comprehensive Dr., Aurora, IL 60505 and Fisher Foundry Systems Co., 407 Hadley St., P.O. Box 40, Holly, MI 48442.

<sup>8</sup> Available from U.S. Silica Co., P.O. Box 577, Ottawa, IL 61350. Sand from other sources was not used in the development of this test method and may give different results.

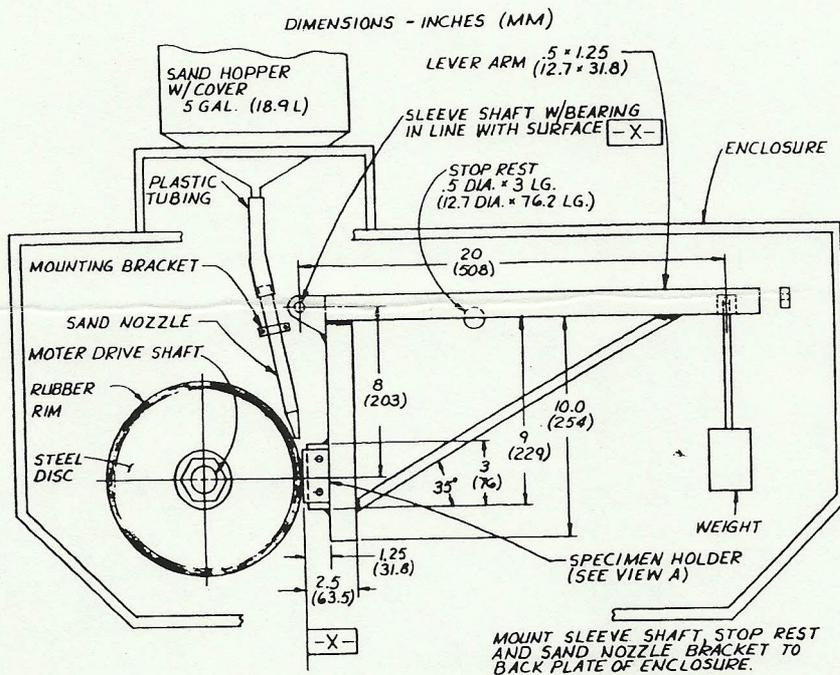
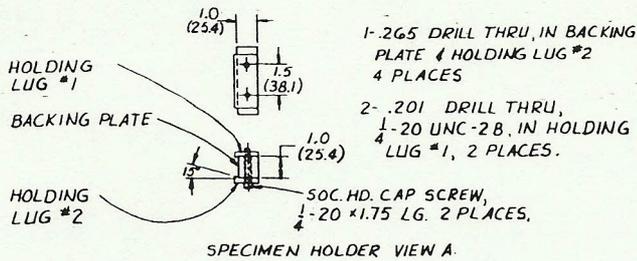


FIG. 2 Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test Apparatus

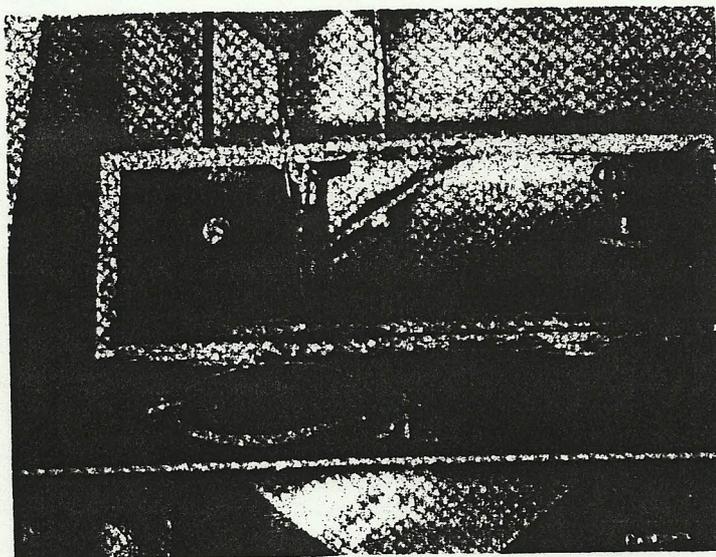


FIG. 3 Wheel and Lever Arm

gular orifice and taper), and the sand flow characteristics (flow rate and streamlined flow) of the fabricated nozzle. (See Figs. 6 and 9.)

6.4.3 *Sand Flow*—The nozzle must produce a sand flow rate of 300 to 400 g/min (0.66 to 0.88 lb/min).

6.4.4 *Sand Curtain*—Figure 9 shows the proper stream-

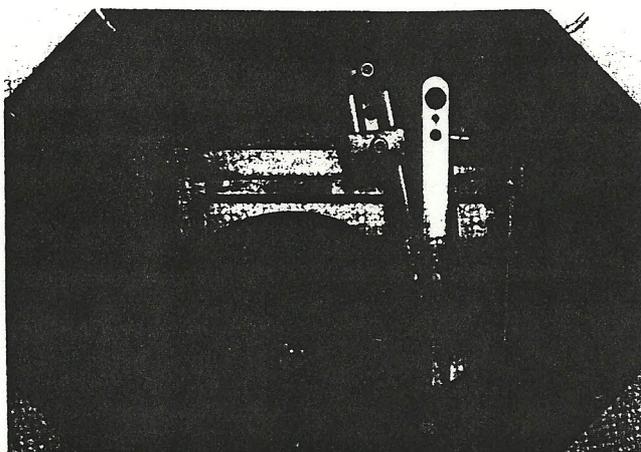


FIG. 4 Enclosure Frame

TABLE 1 Formula for Chlorobutyl Rubber<sup>A</sup>

NOTE—Specific gravity of mix: 1.15. Pressure cure: 20 min at 160°C (320°F).

Materials	Proportions by Weight
Chlorobutyl No. HT 10-66 (Enjay Chemical)	100
Agerite Staylite-S	1
HAF black	60
Circolight oil	5
Stearic acid	1
Zinc oxide	5
Ledate	2

<sup>A</sup> Available from Woodlawn Rubber Co., 6130 Interstate Circle, Cincinnati, OH 05242.

lined flow and the narrow shape of the sand curtain as it exits from the sand nozzle. A turbulent sand flow as depicted in Fig. 10 will tend to produce low and inconsistent test results. It is intended that the sand flows in a streamlined manner and passes between the specimen and rubber wheel.

6.5 *Motor Drive*—The wheel is driven by a nominally 0.7-kW (1-hp) d-c motor through a 10/1 gear box to ensure that full torque is delivered during the test. The rate of revolution ( $200 \pm 10$  rpm) must remain constant under load. Other drives producing 200 rpm under load are suitable.

6.6 *Wheel Revolution Counter*—The machine shall be equipped with a revolution counter that will monitor the number of wheel revolutions as specified in the procedure (Section 9). It is recommended that the incremental counter have the ability to shut off the machine after a preselected number of wheel revolutions or increments up to 12 000 revolutions is attained.

6.7 *Specimen Holder and Lever Arm*—The specimen holder is attached to the lever arm to which weights are added, so that a force is applied along the horizontal diametral line of the wheel. An appropriate number of weights must be available to apply the appropriate force (Table 2) between the test specimen and the wheel. The actual weight required should not be calculated, but rather should be determined by direct measurement by noting the load required to pull the specimen holder away from the

wheel. A convenient weight system is a can filled with sand (see Fig. 2).

6.8 *Analytical Balance*—The balance used to measure the loss in mass of the test specimen shall have a sensitivity of 0.001 g. Procedure C requires a sensitivity of 0.0001 g.

6.9 *Enclosure, Frame, and Abrasive Hopper*—Figures 3 and 4 are photographs of a typical test apparatus. The size and shape of the support elements, enclosure, and hopper may be varied according to the user's needs.

## 7. Specimen Preparation and Sampling

7.1 *Materials*—It is the intent of this test method to allow for the abrasion testing of any material form, including wrought metals, castings, forgings, gas or electric weld overlays, plasma spray deposits, powder metals, metallizing, electroplates, cermets, ceramics etc. The type of material will, to some extent, determine the overall size of the test specimen.

7.2 *Typical Specimen*, a rectangular shape 25 by 76 mm (1.0 by 3.0 in.) and between 3.2 and 12.7 mm (0.12 and 0.50 in.) thick. The size may be varied according to the user's need with the restriction that the length and width be sufficient to show the full length of the wear scar as developed by the test. The test surface should be flat within 0.125 mm (0.005 in.) maximum.

7.3 *Wrought, Cast, and Forged Metal*—Specimens may be machined to size directly from the raw material.

7.4 *Electric or Gas Weld Deposits* are applied to one flat surface of the test piece. Double-weld passes are recommended to prevent weld dilution by the base metal. The heat of welding may distort the test specimen. When this occurs, the specimen may be mechanically straightened or ground, or both. In order to develop a suitable wear scar, the surface to be abraded must be ground flat to produce a smooth, level surface at least 63.4 mm (2.50 in.) long and 19.1 mm (0.75 in.) for the test. (See 7.5.) Note that the welder technique, heat input of welds, and the flame adjustment of gas welds will have an effect on the abrasion resistance of a weld deposit.

7.5 *Finish*—Test specimens should be smooth, flat, and free of scale. Surface defects such as porosity and roughness

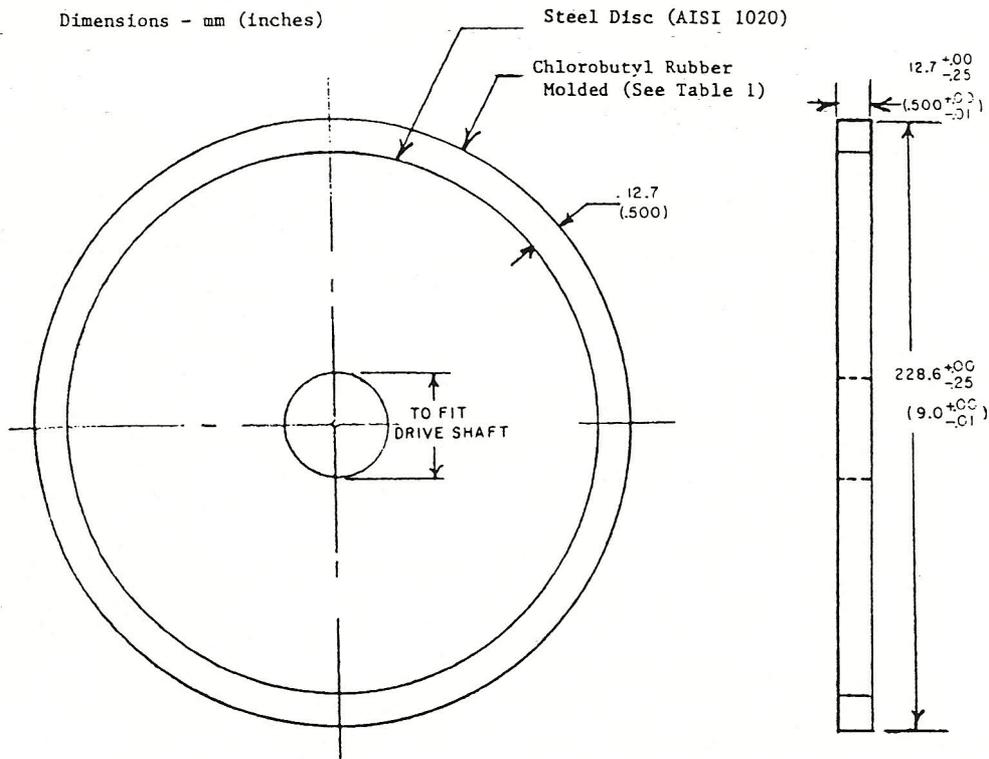


FIG. 5 Rubber Wheel

may bias the test results, and such specimens should be avoided unless the surface itself is under investigation. Typical suitable surfaces are mill-rolled surfaces such as are present on cold-rolled steel, electroplated and similar deposits, ground surfaces, and finely machined or milled surfaces. A ground surface finish of approximately 0.8  $\mu\text{m}$  (32  $\mu\text{in.}$ ) or less is acceptable. The type of surface or surface preparation shall be stated in the data sheet.

### 8. Test Parameters

8.1 Table 2 indicates the force applied against the test specimen and the number of wheel revolutions for test Procedures A through E.

8.2 *Sand Flow*—The rate of sand flow shall be 300 to 400 g/min (0.66 to 0.88 lb/min).

8.3 *Time*—The time of the test will be about 30 min for Procedures A and D, 10 min for Procedure B, 5 min for Procedure E, and 30 s for Procedure C, depending upon the actual wheel speed. In all cases the number of wheel revolutions and not the time shall be the controlling parameter.

8.4 *Lineal Abrasion*—Table 2 shows the lineal distance of scratching abrasion developed using a 228.6-mm (9-in.) diameter wheel rotating for the specified number of revolutions. As the rubber wheel reduces in diameter the number of wheel revolutions shall be adjusted to equal the sliding distance of a new wheel (Table 2) or the reduced abrasion rate shall be taken into account by adjusting the volume loss produced by the worn wheel to the normalized volume loss of a new wheel. (See 10.2.)

### 9. Procedure

9.1 *Cleaning*—Immediately prior to weighing, clean the specimen with a solvent or cleaner and dry. Take care to remove all dirt or foreign matter or both from the specimen. Dry materials with open grains (some powder metals or ceramics) to remove all traces of the cleaning solvent, which may have been entrapped in the material. Steel specimens having residual magnetism should be demagnetized or not used.

9.2 Weigh the specimen to the nearest 0.001 g (0.0001 g for Procedure C).

9.3 Seat the specimen securely in the holder and add the proper weights to the lever arm to develop the proper force pressing the specimen against the wheel. This may be measured accurately by means of a spring scale which is hooked around the specimen and pulled back to lift the specimen away from the wheel. A wedge should be placed under the lever arm so that the specimen is held away from the wheel prior to start of test. (See Fig. 2.)

9.4 Set the revolution counter to the prescribed number of wheel revolutions.

9.5 *Sand Flow and Sand Curtain*—The rate of sand flow through the nozzles shall be between 300 g (0.66 lb)/min and 400 g (0.88 lb)/min. Do not start the wheel rotation until the proper uniform curtain of sand has been established (see Fig. 9 and Note 3).

9.5.1 The dwell time between tests shall be the time required for the temperature of the rubber wheel to return to room temperature. For Procedure B the dwell time shall be at least 30 min.

9.6 Start the wheel rotation and immediately lower the

FABRICATED SAND NOZZLE

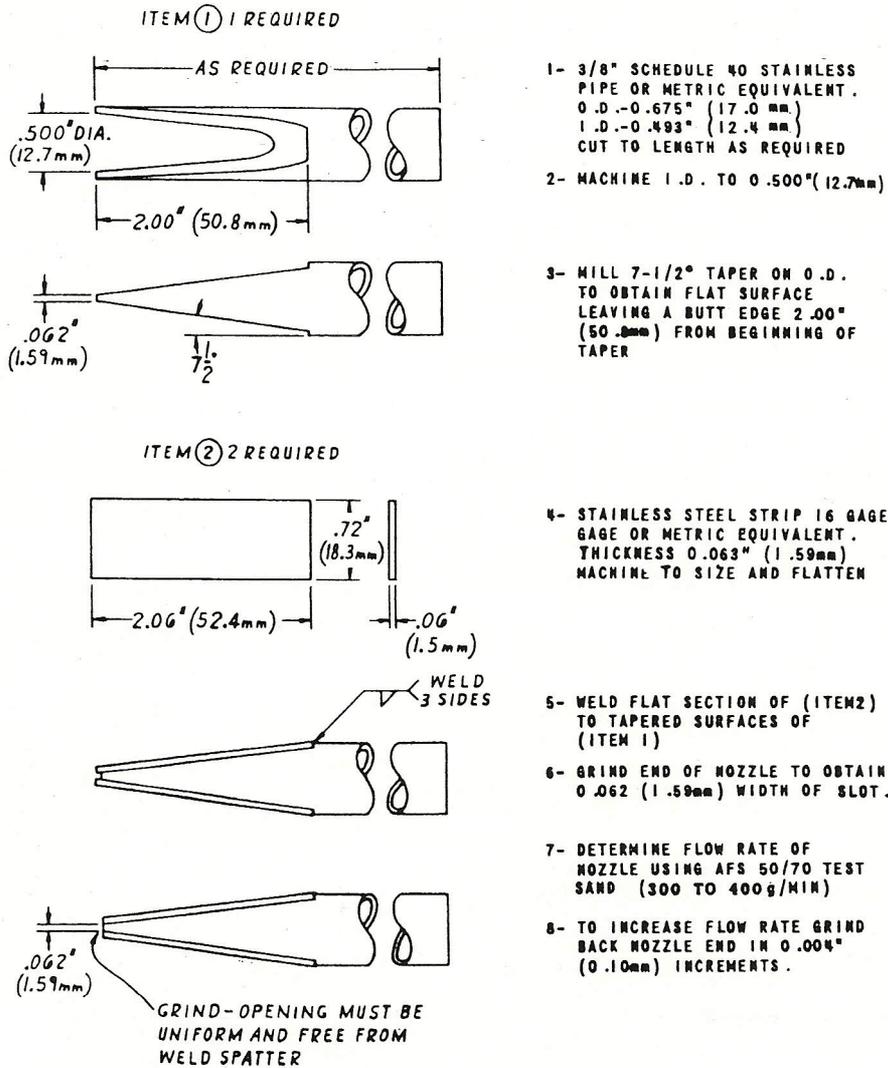


FIG. 6 Sand Nozzle

lever arm carefully to allow the specimen to contact the wheel.

9.7 When the test has run the desired number of wheel revolutions, lift the specimen away from the wheel and stop the sand flow and wheel rotation. The sand flow rate should be measured before and after a test, unless a consistent flow rate has been established.

9.8 Remove the specimen and reweigh to the nearest 0.001 g (0.0001 g for Procedure C).

9.8.1 *Wear Scar*—Observe the wear scar and compare it to the photographs of uniform and nonuniform wear scars in Fig. 11. A nonuniform pattern indicates improper alignment of the rubber rim to the test specimen or an unevenly worn rubber wheel. This condition may reduce the accuracy of the test.

9.9 *Preparation and Care of Rubber Wheels*—Dress the periphery of all new rubber wheels and make concentric to the bore of the steel disk upon which the rubber is mounted. The concentricity of the rim shall be within 0.05 mm (0.002 in.) total indicator reading on the diameter. Follow the same

dressing procedure on used wheels that develop grooves or that wear unevenly so as to develop trapezoidal or uneven wear scars on the test specimen (Fig. 11). The intent is to produce a uniform surface that will run tangent to the test specimen without causing vibration or hopping of the lever arm. The wear scars shall be rectangular in shape and of uniform depth at any section across the width. The rubber wheel may be used until the diameter wears to 215.9 mm (8.50 in.). New rubber rims may be mounted on steel disks by the qualified source (6.2).

9.10 *Wheel Dressing Procedure*—The preferred dressing procedure for the periphery of the rubber rim is to mount a diamond-cut file<sup>9</sup> in place of the specimen in the holder and run the machine with load until the wheel is clean. Another dressing procedure for the periphery of the rubber rim is to mount the wheel on a lathe, and machine the surface with a tool bit especially ground for rubber applica-

<sup>9</sup> Available from the Falex Corp., 2055 Comprehensive Drive, Aurora, IL 60501.

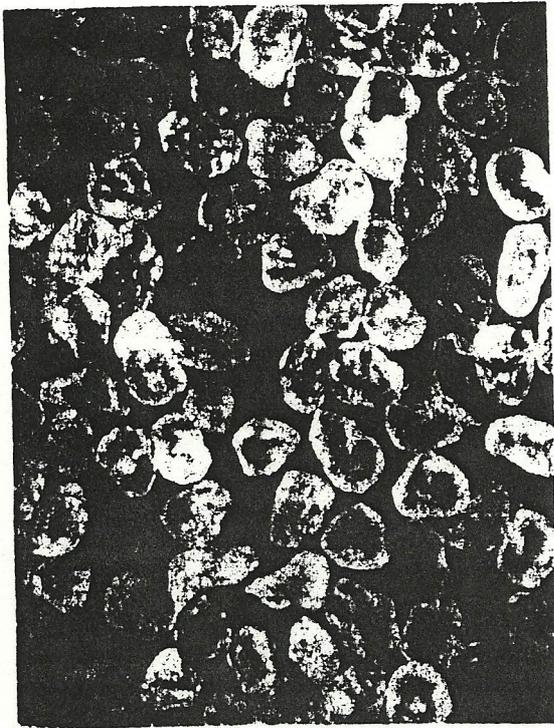


FIG. 7 25X Magnification AFS 50/70 Test Sand Ottawa Silica Co.

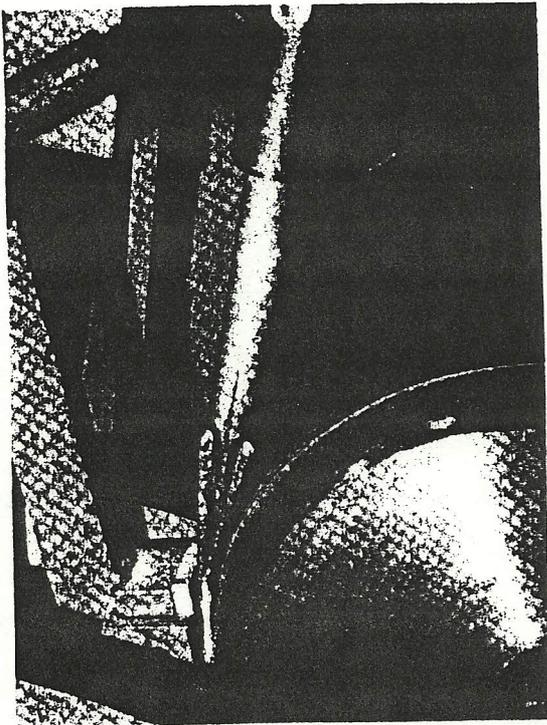


FIG. 8 Position of Sand Nozzle

tions. Grind a carbide or high-speed steel tool bit to very deep rake angles (Fig. 12). Feed the tool across the rubber surface in the opposite direction from that normally used for machining steel. This allows the angular surface of the tool bit to shear away thin layers of rubber without tearing or

forming grooves in the rubber as would occur when using the pointed edges of the tool. The recommended machining parameters are: *Feed*—25 mm/min (1.0 in./min); *Speed*—200 rpm; *Depth of Cut*—0.254 mm (0.010 in.) to 0.762 mm (0.030 in.). The dressed wheel should be first used on a soft carbon steel test specimen (AISI 1020 or equivalent) using Procedure A. This results in a smooth, uniform, non-sticky surface. An alternative dressing method involves the use of a high-speed grinder on the tool post of a lathe. Take great care since grinding often tends to overheat and smear the rubber, leaving a sticky surface. Such a surface will pick up and hold sand particles during testing. If the grinding method is used, not more than 0.05 mm (0.002 in.) may be ground from the surface at one time so as to prevent overheating.

### 10. Calculating and Reporting Results

10.1 The abrasion test results should be reported as volume loss in cubic millimetres in accordance with the specified procedure used in the test. For example, \_\_\_mm<sup>3</sup> per ASTM Procedure \_\_\_. While mass loss results may be used internally in test laboratories to compare materials of equivalent densities, it is essential that all users of this test procedure report their results uniformly as volume loss in publications or reports so that there is no confusion caused by variations in density. Convert mass loss to volume loss as follows:

$$\text{Volume loss, mm}^3 = \frac{\text{mass loss (g)}}{\text{density (g/cm}^3\text{)}} \times 1000$$

10.2 *Adjusting the Volume Loss*—As the rubber wheel decreases in diameter the amount of scratching abrasion developed in a given practice will be reduced accordingly. The actual volume loss produced by these slightly smaller wheels will, therefore, be inaccurate. The “adjusted volume loss” value takes this into account and indicates the actual abrasion rate that would be produced by a 228.6-mm (9.00-in.) diameter wheel. Calculate the adjusted volume loss (AVL) as follows:

$$\text{AVL} = \text{measured volume loss} \times \frac{228.6 \text{ mm (9.00 in.)}}{\text{wheel diameter after use}}$$

10.3 *Reporting Test Results*—All significant test parameters and test data as noted in Tables 2 and 3 shall be reported. Any variation from the recommended procedure must be noted in the comments. The report shall include a statement of the current precision and accuracy of the test apparatus as qualified by the testing of Reference Materials (11.6). The volume loss data developed by the initial qualification tests (11.4) or the volume loss data developed by the periodic re-qualification tests (11.4.3) should be listed on the data sheet (Table 3).

### 11. Precision and Bias

11.1 The precision and bias of the measurements obtained with this test method will depend upon strict adherence to the stated test parameters and maintenance of the proper sand flow rate and sand curtain throughout the duration of the test.

11.2 The degree of agreement in repeated tests on the same material will depend upon material homogeneity, machine and material interaction, and close observation of the test by a competent machine operator.

11.3 Normal variations in the abrasive, rubber wheel

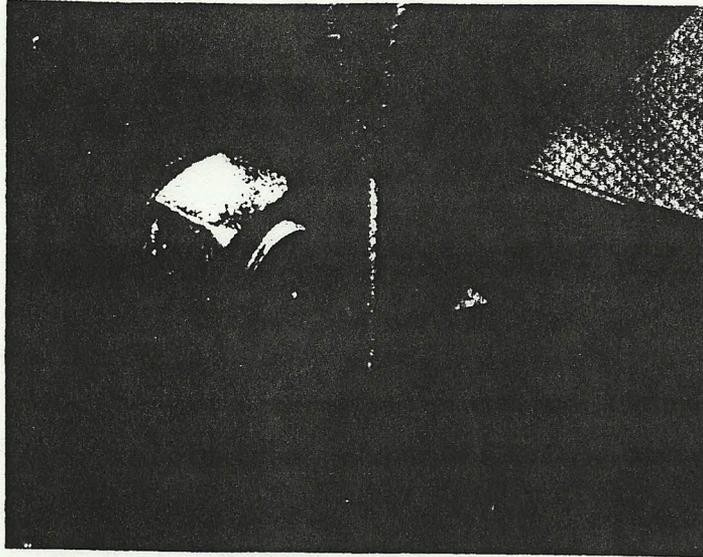


FIG. 9 Sand Flow—Streamlined

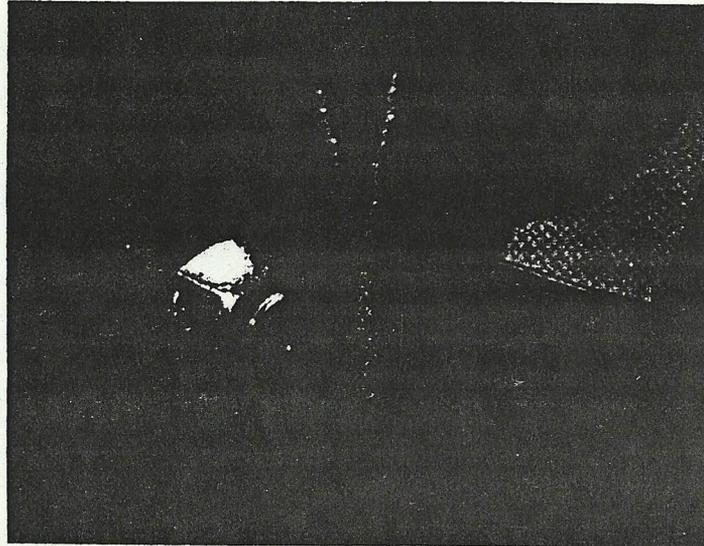


FIG. 10 Sand Flow—Turbulence

TABLE 2 Test Parameters

Specified Procedure	Force Against Specimen, <sup>A</sup> N (lb)	Wheel Revolutions	Lineal Abrasion <sup>B</sup> m	(ft)
A	130 (30)	6000	4309	(14 138)
B	130 (30)	2000	1436	(4 711)
C	130 (30)	100	71.8	(236)
D	45 (10.1)	6000	4309	(14 138)
E	130 (30)	1000	718	(2 360)

<sup>A</sup> Force tolerance is  $\pm 3\%$ .

<sup>B</sup> See 8.4.

N = Newton (SI metric term for force)

1 lbf = 4.44822 N

1 Kgf = 9.806650 N

characteristics, and procedure will tend to reduce the accuracy of this test method as compared to the accuracy of such material property tests as hardness or density.

11.4 *Initial Machine Operation and Qualification*—The number of tests to establish precision and bias of the apparatus for initial machine operation shall be at least five. After initial qualification, a minimum of three tests may be used to periodically monitor precision and bias. These tests shall be made using Reference Materials (11.6) and the statistical calculations made, using formulas described in Practice E 122.

11.4.1 Tables X1.1 and X1.2 show representative coefficients of variation or standard deviations, or both, which were obtained in the interlaboratory tests. The coefficient of variation or the standard deviation, or both, for reference materials shall not exceed the values reported. If this value is exceeded, the machine operation shall be considered out of control and steps taken to eliminate erratic results.

11.4.2 The coefficient of variation tends to be higher for materials with volume losses in the range from 1 to 5 mm<sup>3</sup>. In such cases, the coefficient of variation is about 20 %.

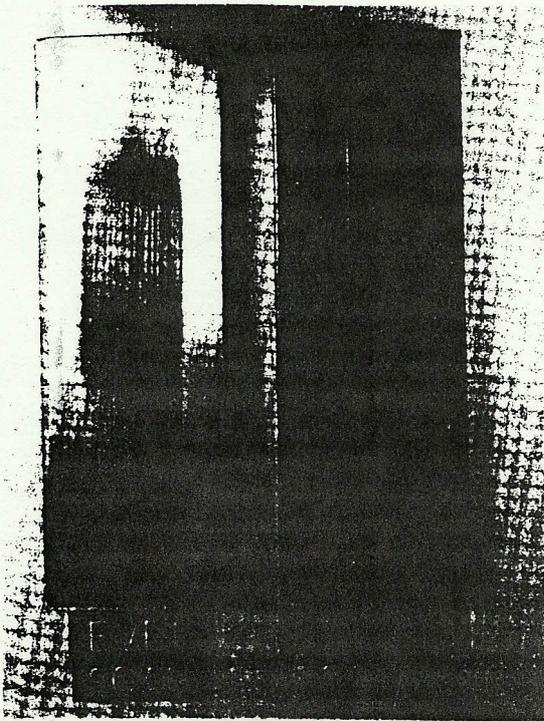


FIG. 11 Typical Wear Scars Uneven and Nonuniform Wear Scars Indicate Improper Alignment or Wear of Rubber Wheel

11.4.3 In any test series all data must be considered in the calculation including outliers (data exceeding the obvious range). For example, an exceedingly high- or low-volume loss must not be disregarded except in the case of observed faulty machine operation.

11.4.4 *Re-Qualification of Apparatus*—After the test apparatus has been initially qualified, it is required that one or more standard reference materials be periodically tested to ensure the accuracy of the data generated by the apparatus.

This is particularly necessary when new test operators are involved or when the apparatus is not used on a regular basis. Re-qualification is also required for interlaboratory testing and for the qualification of materials as specified in customer and vendor contracts.

11.5 While two or more laboratories may develop test data that is within the acceptable coefficient of variation for their own individual test apparatus, their actual averages may be relatively far apart. The selection of sample size and the method for establishing the significance of the difference in averages shall be agreed upon between laboratories and shall be based on established statistical methods in Practices E 122, E 177, and Manual MNL 7.<sup>10</sup>

11.6 *Reference Materials*—Reference materials<sup>11</sup> may be used for periodic monitoring of the test apparatus and procedures in individual laboratories.

11.6.1 While any of the four test procedures (Table 2) may be used on reference materials, it is recommended that Procedure A be used for the more abrasion-resistant materials such as AISI D-2 Tool Steel. When Procedure A volume loss values exceed 100 mm<sup>3</sup> in materials such as annealed low-carbon steel, greater accuracy in material ranking can be obtained by using Procedures B or D.

11.6.2 *Three Types of Reference Materials:*

11.6.2.1 *AISI D-2 Tool Steel (Nonfree-Machining Type)*—This is Reference Material No. 1 for Procedure A.<sup>12</sup>

- (a) Harden 1010°C (1850°F)—25 min at temperature.
- (b) Air cool to room temperature.
- (c) Temper at 205°C (400°F)—1 h at temperature.
- (d) Air Cool Hardness 59–60 HRC.

<sup>10</sup> Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis, ASTM MNL 7, ASTM.

<sup>11</sup> Contact the Office of Standard Reference Materials, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, or ASTM Headquarters.

<sup>12</sup> For information on D-2 Tool Steel, Standard Reference Material No. 1457, contact the Office of Standard Reference Materials, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899.

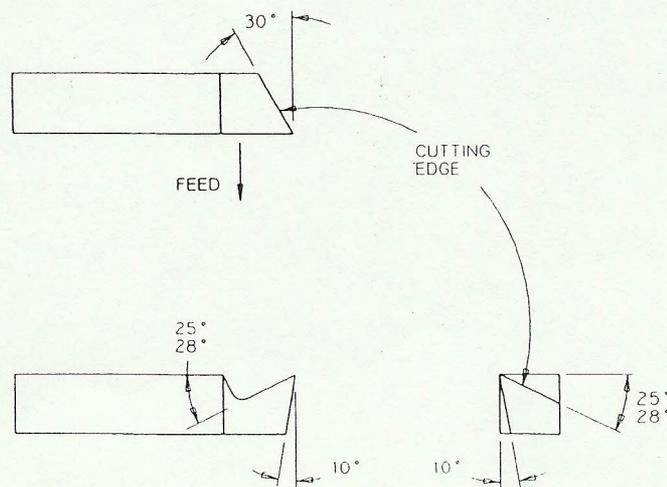


FIG. 12 Typical Wheel Dressing Tool

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

XI. SOME STATISTICAL CONSIDERATIONS IN ABRASION TESTING

X1.1 Background

X1.1.1 The Dry Sand/Rubber and Wheel Abrasion Test as developed and described by Haworth, Avery, and others (1) through (7) has been in various stages of evolution and use since 1960. A number of variations of this test procedure have been used by several research and industrial laboratories in the United States who were faced with the problem of evaluating hard surfacing alloys, castings, and wrought products for their resistance to abrasive wear. Individual laboratories set their own test parameters with the goal being the generation of reproducible test data within the laboratory. As the need for standardization became apparent, Subcommittee G02.30 formed a task group to study the effect of each test parameter on the overall results within individual laboratories and among all laboratories as a group. While standardization of test parameters was attained, it became evident that the variability or experimental error inherent in each laboratory was a factor that must be considered. Not only must the test method, apparatus, and individual operator generate repeatable results, but the test results must be consistently reproducible within an acceptable range. Another important consideration in establishing repeatable and reproducible test results was the selection of an adequate sample size. More specifically this was the need for laboratories to agree on the number of times a test should be repeated on a given homogeneous material in order to obtain a meaningful average result. While single test results and simple arithmetic averaging may in some few cases be useful in individual laboratories, it is essential that statistical techniques and multiple testing of specimens be utilized for the qualification of each test apparatus, and for the comparison of materials. Further information on statistical methods may be found in Recommended Practice E 122, MNL 7, and in the references.

X1.2 Statistical Equations

X1.2.1 Several equations for the calculation of standard deviation and coefficient of variation are used in the statistical analysis of data shown in Table X1.1. To ensure uniformity among laboratories using the dry sand/rubber wheel test, the standard deviation and coefficient of variation

of results produced from a series of tests should be calculated by the following equations:

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{p} (\sum S_j^2)}$$

$d$  = deviations from average,  $(\bar{x}_j - \bar{x})$

$$S_x = \sqrt{\sum(d^2)/p - 1}$$

$S_L = \sqrt{(S_x)^2 - (S_r)^2}$ ;  $S_L = 0$  if the quantity under the root sign is negative.

$S_R = \sqrt{(S_x)^2 + (S_L)^2}$ , is the reproducibility standard deviation of the test method for the parameter measured.

$V_r(\%) = 100(S_r)/(\bar{x})$ , the estimated relative standard deviation or coefficient of variation within a laboratory for the parameter measured (repeatability).

$V_L(\%) = 100(S_L)/(\bar{x})$ , the estimated relative standard deviation or coefficient of variation between laboratories for the parameter measured (reproducibility).

where:

$p$  = number of laboratories,

$n$  = number of replicate tests,

$\bar{x}_j$  = average of  $n$  number of replicate tests of each, laboratory of parameter  $j$ ,

$S_j$  = standard deviation,

$\bar{x}$  = average of  $\bar{x}_j$ 's for all laboratories of each parameter,

$S_r$  = estimated repeatability standard deviation within, and a laboratory for each parameter measured.

X1.3 Typical Volume Loss Values

X1.3.1 Procedure A of the Dry Sand/Rubber Wheel Test will produce volume losses in metallic materials ranging from 0.25 to 250 mm<sup>3</sup>. The more abrasion-resistant materials will develop the least volume loss. Table X1.2 shows typical volume loss ranges that may be expected in the metals listed. They are offered as guidelines only and not as purchasing specifications or as standard reference specimens. Any material specifications involving this test method must be by agreement between the seller and the purchaser. When volume losses exceed 100 mm<sup>3</sup>, greater accuracy in material ranking is obtained by using Procedure D (see Table 2). Procedure A should be used for the more abrasion-resistant materials. Procedure E or B can be used for materials with volume losses in the range from 50 to 100 mm.<sup>5</sup>

**TABLE X1.1 Statistical Analyses of Interlaboratory Test Results**

Round-Robin Test Conditions	Specified Procedure	Number of Samples	Average, mm <sup>3</sup>	Standard Deviation Within, mm <sup>3</sup>	Standard Deviation Between, mm <sup>3</sup>	Coefficient of Variation Within, %	Coefficient of Variation Between, %	Coefficient of Variation Total, %	Standard Deviation Total, mm <sup>3</sup>
RR No. 15 4340 steel	E	3	51.63	1.67	0.75	3.2	1.5	3.5	1.83
RR No. 14A and 14B 4340 steel	E	3	47.74	1.84	2.46	3.9	5.2	6.04	3.07
RR No. 14A and 14B 4340 steel	B	3	91.08	2.18	4.98	2.4	3.5	6	5.44
RR No. 12 WC-14 weight % CO 0.010 in. thick	A	4	2.18	0.14	0.42	6.4	19.3	20.4	0.44
RR No. 14 hard-chrome plating 0.010 in. thick	C	3	1.33	0.1	0.25	7.4	19.1	20.5	0.27

**TABLE X1.2 Volume Loss Range**

	Standard Values (Mean ± Standard Deviation) <sup>A</sup>				
	Practice A, mm <sup>3</sup>	Practice B, mm <sup>3</sup>	Practice C, mm <sup>3</sup>	Practice D, mm <sup>3</sup>	Practice E, mm <sup>3</sup>
AISI Tool Steel D-2 Reference Material No. 1 <sup>B</sup>	35.6 ± 5.2	...	...	...	...
AISI Tool Steel H-13 Reference Material No. 2 <sup>B</sup>	...	55.6 ± 4.2	...	...	...
AISI 4340 Steel Reference Material No. 3 <sup>B</sup>	...	...	...	91.1 ± 5.4	49.2 ± 2.9
Nonstandard Values					
316 stainless bar annealed RB-80	260 ± 20	...	...	58.5 ± 26.6	...
AISI 1090 plate-normalized 900°C (1600°F) air-cooled 24-26 HRC	80.7 ± 8.0	...	...	33.0 ± 6.0	...
17-4PH stainless-aged 500°C (925°F)-4 h at temperature, air-cooled-43 HRC	220 ± 20	122.1 ± 15.3	...	70.9 ± 6.1	...
Stellite 1016 hard surfacing overlay 57-58 HRC applied by oxyacetylene welding process (35 flame)	17 ± 4	...	...	...	...
Sintered tungsten carbide (Kennametal K-714, Valenite 2889)	1.9 ± 0.3	...	...	...	...
WC-Co flame spray coatings	2.2 ± 0.4	...	...	...	...
Hard-chrome plating	...	...	1.3 ± 0.3	...	...

<sup>A</sup> The mean values and standard deviation for volume loss reported were calculated from the values in Research Report RR:G02.1006.

<sup>B</sup> See 11.6.2 for heat treat.

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

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 1916 Race St., Philadelphia, PA 19103.

TABLE 3 Data Sheet

Dry Sand/Rubber Wheel Test  
ASTM G-65 Procedure \_\_\_\_\_

Qualification of Apparatus (11.4): \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_  
Reference Materials \_\_\_\_\_ Quantity \_\_\_\_\_  
Adjusted Volume Loss (avg) \_\_\_\_\_ mm<sup>3</sup> Coefficient of Variation \_\_\_\_\_

Test Data

Material Description: \_\_\_\_\_ Wheel diameter: \_\_\_\_\_  
Heat Treatment: \_\_\_\_\_ Wheel width: \_\_\_\_\_  
Hardness: \_\_\_\_\_ Wheel hardness: \_\_\_\_\_  
Surface Preparation \_\_\_\_\_

Test No.							
Test load							
Wheel revolutions							
Sand flow, g/min							
Initial mass, g							
Final mass, g							
Mass loss, g							
Density, g/cm <sup>3</sup> <sup>4</sup>							
Volume loss, mm <sup>3</sup> (mass loss/density) × 1000							
Adjusted volume loss, mm <sup>3</sup>							

Comments: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Company Name \_\_\_\_\_ Tested by \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_

<sup>4</sup> Density of materials may be obtained from *ASM Metals Handbook*, Vol 1, 8th ed. or suppliers of materials.

(e) Procedure A, qualifying volume loss range— $36 \pm 5$  mm<sup>3</sup>.

11.6.2.2 *AISI H-13 Tool Steel*—This is Reference Material No. 2 for Procedure B.<sup>13</sup>

(a) Harden 1010/1024°C (1850/1875°F) in neutral salt bath 25 min at temperature.

(b) Air cool to room temperature.

(c) Double temper at 593°C (1100°F) for 2 h and 2 h. Air cool between tempers. Hardness 47–48 HRC.

(d) Procedure B, qualifying volume loss range— $56 \pm 4$  mm<sup>3</sup>.

11.6.2.3 *AISI 4340 Steel*—This is Reference Material No. 3 for Procedures B or E.

(a) Normalizing heat treatment.

(b) Hardness 31-33 HRC.

(c) Procedure E, qualifying volume loss range— $49 \pm 3$  mm<sup>3</sup>.

(d) Procedure B, qualifying volume loss range— $91 \pm 5$  mm<sup>3</sup>.

11.6.3 Volume loss values for reference materials are developed in interlaboratory testing by the Abrasive Wear Task Group of ASTM Subcommittee G02.30.<sup>14</sup> (See Appendix X1.3 for typical volume loss values of other materials.) It is the intent of Subcommittee G02.30 to develop several reference materials for abrasive wear testing.

<sup>13</sup> For information on H-13 Tool Steel and 4340 steel contact ASTM Headquarters, Subcommittee G02.30. A qualified source for test specimen is Falex Corp., 2055 Comprehensive Dr., Aurora, IL 60501.

<sup>14</sup> Supporting data available from ASTM Headquarters. Request RR: G02-1006.

REFERENCES

- (1) Avery, H. S., "The Nature of Abrasive Wear," *SAE Preprint 750822*, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1975.
- (2) Tucker, R. C., and Miller, A. E., *Low Stress Abrasive and Adhesive Wear Testing, ASTM STP 615*, Philadelphia, PA, 1975, pp. 68–90.
- (3) Avery, H. S., "The Measurement of Wear Resistance," *Wear*, Vol 4, No. 6, November/December 1961, pp. 427–449.
- (4) "Report of Iron and Steel Technical Committee," *Abrasive Wear*, 1965, Society of Automotive Engineers, 1966.
- (5) Borik, F., "Rubber Wheel Abrasion Test," *SAE Preprint 700687*, Society of Automotive Engineers, 1970.
- (6) Avery, H. S., "Classification and Precision of Abrasion Tests," *Source Book on Wear Control Technology*, American Society for Metals, Metals Park, OH, 1978.
- (7) Haworth, R. D., Jr., "The Abrasion Resistance of Metals," *Transactions American Society for Metals*, Vol 41, 1949, pp. 819–854.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Avner, S. Introducción a la Metalurgia Física. México: Mc Graw Hill; 2da Edición, 1979.
2. American Society for Metals, Metals Handbook Committee; Properties and Selection of Metals, Metals Handbook Vol.1, 8<sup>th</sup> Edition, ASM, EE.UU., 1986.
3. George A., Roberts; George, Krauss, y Richard L., Kennedy. : Tool steels, 5<sup>th</sup> edition, ASM international, 1997.
4. CATALOGO FERRUM. FERRUM: División de Aceros Especiales, 1998
5. CATALOGO SUMINDU. Aceros especiales e inoxidable, 2005.
6. Secuencia de pulido Struers Diffusion Coating. disponible: [http://www.struers.com/modules/emetalog/generic\\_view.asp?print=1&method=231](http://www.struers.com/modules/emetalog/generic_view.asp?print=1&method=231) [Consulta: 2008, octubre 10]}
7. Calderon, Julia M. Nitruración en baño de sales. Lima, Perú. 1984.
8. Lamberto A., Rubio F. Estudio de la Nitruración en Aceros. Separata del número 4, Año 5. De la revista del instituto del Hierro y del Acero. 1952, pp. 181-193.
9. Deussa-Durferrit., Sobre un proceso de nitruración en baño de sales no contaminante. 1998.
10. Y.Z. Shen, K.H. Oh, D.N. Lee. Nitriding of steel in potassium nitrate salt bath. 2005.
11. Glossary Terms, ASM Handbook, Vol. 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, American Society for Metals International, 1995.
12. Perez Y., Desempeño Tribológico A Alta Temperatura Del Acero AISI 4340 Y Acero De Herramienta D2 Nitrurados Con Y Sin Recubrimientos Obtenidos Por PVD. Universidad Central de Venezuela. 2008.
13. ASTM G 65-81, Conducting dry sand/rubber Wheel abrasion tests. 1999.
14. Ludema, K.C., Friction, Wear, Adhesion and Lubrication-Tribology, The University of Michigan, 1993.
15. Buckley, D.H., Thin Solid Films, 53 (1978) 271.
16. Castillo, E., Staia M., Pertuz A. Evaluación de las Propiedades Tribológicas de un Recubrimiento NI-P obtenido por Electrolisis, Universidad Central de Venezuela, 1995.
17. Justice, B., Products Finishing, 37 (1984) 56.

18. Quinn, T.F.J., en ASM Handbook, Vol. 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, American Society for Metals International, 1995.
19. Khrushchov, M. M. / Babichev, M. A.; An Investigation of the Wear of Metals and Alloys by Rubbing on an adhesive surface, Friction and Wear in Machinery Vol. 12 (1958).
20. Khrushchov, M. M; Wear 28 (1974), Elsevier. p. 69.
21. Richardson, R. C. D. The Maximum Hardness of Strained Surfaces and the Abrasive Wear of Metals and Alloys, Wear Vol. 10 (1967), Elsevier, pp. 353-382.
22. Khrushchov, M. M. / Babichev, M. A.; An Investigation of the Wear of Metals and Alloys by Rubbing on an adhesive surface, Friction and Wear in Machinery Vol. 12 (1958), pp. 1-13.
23. Fiore, N. F.; Microestructural Effects in Abrasive Wear, Proposal submitted to ERDA, University of Notre Dame, EE.UU., 1976, p.50.
24. Avery, H. S.; Discussion to paper by D. E. Diesburg and F. Borik. (Ref. 35), University of Notre Dame, EE.UU, 1977, 5 p.
25. Richardson, R. C. D. The Maximum Hardness of Strained Surfaces and the Abrasive Wear of Metals and Alloys, Wear Vol. 10 (1967), Elsevier, pp. 353-382.
26. Larsen-Basse, J.; Influence of Atmospheric Humidity on Abrasive Wear – I. 3-Body Abrasion, Wear Vol. 31 (1975), Elsevier, pp. 373-379.
27. Larsen-Basse, J.; Influence of Atmospheric Humidity on Abrasive Wear – II. 2-Body Abrasion, Wear, Vol. 32 (1975), Elsevier, pp. 9-14.
28. Mercer, A. D. / Hutchings, I. M.; The Influence of Atmospheric Humidity on the Abrasive Wear of Metals, Proceedings of the International Conference on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, EE.UU, 1985, pp. 332-337.
29. Madsen, B. W.; Measurements of Erosion-Corrosion Synergism with a Slurry Wear Test Apparatus, Proceedings of the International Conference on Wear of Materials, American Society of Mechanical Engineers, EE.UU, 1987, pp. 777-786.
30. Bhushan, B. y Gupta, B.K., Handbook of Tribology, McGraw-Hill, Inc., 1991.
31. Ludema, K.C., Friction, Wear, Adhesion and Lubrication-Tribology, The University of Michigan, 1993.
32. Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, John Wiley and Sons, Inc., 1965.
33. Lajtin, Yu. Tratamiento Térmico de los Metales, Editorial Mir., Moscú, 1987.

34. F.T. Hoffmann y P. Mayr, Nitriding and Nitrocarburizing, ASM Handbook, Vol. 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, American Society for Metals International, 1995.
35. Tylczak Joseph H. y Albany Oregon, Abrasive Wear, ASM Handbook, Vol. 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, American Society for Metals International, 1995.
36. Smith William F., Fundamentos de la Ciencia e Ingenieria de Materiales, Ductibilidad en aceros, Propiedades Mecanicas de los Aceros, 1997.
37. Hernandez M., Staia M.H., Puchi-Cabrera E.S.. Evaluation of microstructure and mechanical properties of nitrided steels, Surface & Coatings Technology 202, 2008, pp. 1935-1943.
38. Perozo Q. Isabel M., Miguel C. Avila. D., Efectos del tratamiento térmico en las propiedades tribológicas del acero AISI 4340, Universidad Central de Venezuela, 2000.
39. Helmut Kunst, Diffusiones verfahren und ihre Anwendung zur Verschleiminderung an werkzeugen und Maschienelementen, Frankfurt/Main: Degussa-Durferrit, 1977.
40. Finner B., Wolfgang, Konstitution, Verfahrenstechick und Anwendung Verschle Fester Diffussionsschichten, Frankfurt/Main: Degusa-Durferrit, 1973.
41. Quinn, T.F.J., en ASM Handbook, Vol. 18: Friction, Lubrication and Wear Technology, American Society for Metals International, 1995.
42. Ma X., R. Liu, D.Y. Li , Abrasive wear behavior of D2 tool steel with respect to load and sliding speed under dry sand rubber wheel abrasion condition, ,Wear 241 2000, pp. 79 – 85.
43. Avery H.S., An analysis of the rubber wheel abrasion test, in: S.K.Rhee, A.W. Ruff, K.C. Ludema Eds., Proc. Int. Conf. On Wear of Materials, ASME, New York, 1981, pp. 367 – 378.
44. R.D. Haworth Jr., The abrasion resistance of metals, Trans. ASM 41,1949, pp. 819 – 869.
45. Stevenson I. A.N.J., I.M. Hutchings, Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test, Wear 195, 1996, pp. 232-240.