



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

*Facultad de Ingeniería Mecánica*

*Centro de Investigaciones de Soldadura*

*Trabajo de Diploma*

*Título: Limas abrasivas obtenidas a partir de escorias  
aluminotérmicas y cemento P-350*

*Autor: Alejandro Leal Jimenez*

*Tutor: Dr. Carlos René Gómez Pérez*

*Curso por encuentro  
Curso 2008-2009*

**CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA**



# ÍNDICE

Introducción .....	2
Desarrollo .....	5
Capítulo I: Limas cerámicas .....	5
1.1. Tipos de herramientas abrasivas .....	5
1.2. Clasificación y propiedades de los materiales abrasivos .....	6
1.3. Materiales empleados en la fabricación de limas cerámicas .....	14
1.4. Consideraciones sobre el precio de las herramientas abrasivas .....	15
1.5. Formas de las limas cerámicas. Moldes y procedimiento de fabricación.....	15
1.6. Ensayos de abrasividad .....	16
1.7. Desgaste.....	17
1.8. Cemento Portland P- 350 .....	18
1.9. Conclusiones Parciales de Capitulo I.....	20
Capítulo II: Desarrollo de limas cerámicas .....	21
2.1. Selección de los materiales .....	21
2.2. El Cemento Pórtland P-350 (aglutinante) .....	22
2.3. Fabricación de los moldes .....	27
2.4. Diseño experimental .....	27
2.5. Procedimiento Experimental .....	29
2.6. Elaboración de las probetas para el ensayo Charpy.....	37
2.7. Conclusiones Parciales del Capítulo II.....	39
Capítulo III: Desarrollo de limas cerámicas .....	40
3.1. Resultados de cálculo de desgaste .....	40
3.2. Criterios estadísticos sobre el diseño de experimento .....	41
3.3. Criterios económicos sobre la fabricación de las limas abrasivas. ....	47
3.4. Valoración medioambiental.....	49
3.5. Conclusiones Parciales del Capitulo III.....	50
Conclusiones Generales.....	51
Recomendaciones .....	53
Referencias Bibliografías .....	54
ANEXO 1: Tablas .....	1
ANEXO 2: Figuras .....	11
ANEXO 3: Dibujo .....	22

## Resumen

El trabajo muestra los pasos para la obtención de limas abrasivas de mano destinadas al afilado de machetes y otros instrumentos de trabajo agrícola. Las limas se obtienen a partir del uso, como material abrasivo, de residuos (escorias) del proceso aluminotérmico, desarrollado para la obtención de ferrocromo, empleando la pirolusita como materia prima. La escoria está compuesta por un 60 % de corindón u óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y 35 % de galaxita o aluminato de manganeso ( $MnAl_2O_4$ ), siendo caracterizada por estudios anteriores. La concepción de la lima radica en la aglutinación del abrasivo con una mezcla de cemento ordinario de construcción (Pórtland P-350) y agua. Se desarrolla en la investigación un estudio de las relaciones de agua, abrasivo y cemento, estudiándose la mejor combinación de la mezcla, considerando también, como variable independiente, el tiempo de curado en agua. Se exponen los moldes construidos para la fabricación de las limas, así como la metódica para la obtención de sus prototipos experimentales. En el trabajo se incluye una descripción de los tipos de abrasivos más empleados en la construcción de limas cerámicas y los ensayos fundamentales a las que están sometidas.

**Palabras claves:** limas cerámicas, abrasivos, cemento, abrasividad

## Summary

In the present work the steps for the obtaining of abrasive handing files for the knife and other instruments sharp of agricultural work are shows. The files are obtained starting from the use, as abrasive material, of residuals (slag) of the aluminutermic process, developed for the ferrocromo obtaining, using the pirolusite like matter prevails. The scum is composed by 60 % corindon or aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) and 35 % galaxite or manganese aluminate ( $MnAl_2O_4$ ), being characterized by previous studies. The conception of the file resides in the agglutination of the abrasive with a mixture of ordinary cement of construction P-350 and it dilutes. It is developed in the investigation a study of the relationships of water, abrasive and cement, being studied the best combination in the mixture, considering the time of having cured in water. The molds are described used for the construction of the files, as well as the methodical one for the obtaining of the prototypes of experimental files. In the work a description of the types is included of abrasive more employees in the construction of ceramic files and the fundamental rehearsals to those that are subjected.

**Key words:** ceramic file, abrasive, cement, abrasion.

## Introducción

La demanda en la industria hace que se produzca una cantidad de materiales abrasivos y herramientas, los cuales se emplean en múltiples formas, por ejemplo discos y muelas abrasivas para trabajos de desbaste, de acabado de piezas y afilado herramientas manuales y para el maquinado. Además, en el pulido de pisos de las construcciones se utilizan en forma de bloques sólidos y en otros casos en forma de polvos, como en las operaciones de limpieza y acabado con “*Sand Blasting*” y como pasta abrasivas.

El Centro de Investigación de Soldadura tiene más de 20 años de fundado. Desde sus inicios trabaja en la obtención de materiales para soldar (electrodos y fundentes). Hasta la actualidad en el centro se ha diversificado la cantidad de tipos de materiales obtenidos. Esta diversificación responde, no solo a las satisfacciones del país, sino también a la problemática interna del centro, en cuanto a las potencialidades de su equipamiento, desarrollado para la obtención de los materiales, y atendiendo a la problemática energéticas del país, necesaria a considerar.

Decisivamente, la adaptación a la esta situación ha traído consigo el empleo de alternativas tecnológicas para la obtención de materiales para soldar. Para la solución a esta problemática se han desarrollo procesos aluminotérmicos para la obtención de ferroaleaciones, que potencian, además, el desarrollo de la industria de las materias primas cubana.

Como subproductos en la obtención aluminotermia de ferromanganeso, a partir de la reducción de la pirolusita, se obtiene una escoria, cuyas características le permiten ser valoradas como posible material refractario y/o abrasivo. Estas potencialidades han sido demostradas satisfactoriamente en trabajos investigativos del Centro [1-3].

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental la utilización de los compuestos de corindón y galaxita, contenidos en la escoria del proceso de reducción aluminotérmica de la pirolusita para la obtención de ferromanganeso, como posible constituyente abrasivo de una lima de mano para el afilado manual, aglutinada con una mezcla de cemento y agua.

### **Necesidad de la investigación**

El programa agroindustrial cubano requiere de herramientas para el afilado de útiles de labranza. Las industrias mecánicas cubanas requieren de herramientas abrasivas para la producción de partes de piezas y equipos. Ambos conjuntos de herramientas son

importadas, gravando la economía nacional. En Cuba se elaboran herramientas abrasivas, limitadas a muelas abrasivas cilíndricas, elaboradas empleando técnicas de sinterización. El uso de la energía para este proceso y las materias primas importadas (abrasivos) encarecen y limitan su producción. La búsqueda de alternativas a estas dificultades conduce como una solución factible la combinación de los abrasivos obtenidos, como desechos de procesos metalúrgicos (escorias), con alternativas menos costosas (uso del cemento como aglutinante) para la producción de herramientas abrasivas.

### **Novedad de la investigación**

La combinación de escorias aluminotérmicas y una mezcla de cemento P-350 y agua para la obtención de limas abrasivas destinadas al afilado de herramientas de labranza.

### **Hipótesis:**

La mezcla de escorias aluminotérmicas, cemento P-350 y agua, en relaciones específicas, combinada con un proceso adecuado de curado, permite garantizar una herramienta abrasiva con niveles de abrasividad suficientes, como ser empleada como materia prima para la elaboración de limas abrasivas, destinadas al afilado de herramientas de labranza.

### **Objetivo General:**

Determinar la composición adecuada para la producción de limas de mano, a partir del uso mezclas de escorias aluminotérmicas, cemento P-350 y agua, a través del estudio de abrasividad sobre probetas de acero.

### **Objetivos Específicos:**

1. Conocer los principales productores, materiales, diseño y estructura de las limas de mano empleadas en el afilado de herramientas, mediante un estudio exhaustivo del estado del arte.
2. Determinar los principales materiales alternativos a emplear para la obtención en Cuba de limas de mano empleadas en el afilado de herramientas, a través de un análisis de las potencialidades del territorio.
3. Determinar el diseño adecuado y construir los moldes apropiados para la fabricación, a escala de laboratorio de de las limas de mano empleadas en el afilado de herramientas.

4. Estudiar el comportamiento las limas obtenidas con materias primas, mediante ensayos de abrasividad e impacto.

**Tareas:**

1. Realizar búsqueda bibliografía sobre los tipos de abrasivos y la granulometría de las limas que se van a construir.
2. Investigar sobre las características de cemento P-350 y sus potencialidades como elemento aglutinante e materiales abrasivos.
3. Realizar molde para la elaboración de limas.
4. Realizar un diseño de experimento, que relaciones los componentes de las limas y el tiempo de fraguado.
5. Realizar los ensayos de resistencia de abrasividad e impacto y determinar cual es la mezcla idónea para las evaluación de las limas obtenidas.

## Desarrollo

### Capítulo I: Limas cerámicas

#### 1.1. Tipos de herramientas abrasivas

En la práctica se pueden encontrar muelas abrasivas de distintas formas (Figura 1.1) [4]. Las muelas planas (Figuras 1.1 a – e) sirven para el esmerilado redondo exterior; las de forma de vaso (Figuras 1.1 f, g) se emplea principalmente para esmerilar los planos; y las de forma de plato (Figura 1.1 h, i), para afilar fresas, escariadores, machos de roscar, etc.; muelas para esmerilar las superficies cilíndricas y cónicas interiores (Figura 1.1 j, k); para afilar agujas (Figura 1.1 l) y para afilar las cuchillas de las separadoras (Figura 1.1 m).

Según la bibliografía consultada [4] los diámetros de las muelas oscilan de 3 hasta 2500 mm. Al elegir la calidad del aglutinante, la granulometría y la dureza de la muela se toma en consideración varios aspectos. Para el esmerilado de acero templados duros se debe emplear muelas blandas. Las muelas duras, con una estructura porosa, sirven bien para el esmerilar metales blandos. Para alcanzar un mejor rendimiento se emplean muelas de grano grueso. Con el fin de obtener mejor calidad de las superficies acabadas se usan muelas de grano fino. Así, por ejemplo, para el esmeril de acero de construcción templado se elige una muela con clase de abrasivo  $\mathfrak{A}$  y  $\mathfrak{AB}$ , con granulosisidad de 36-80, dureza  $CM1-M3$ , y aglutinantes  $K$  ó  $B$ . Para el esmerilado del bronce duro se emplea las muelas con clase de abrasivo  $\mathfrak{A}$  con granulosisidad de 36-60, dureza  $CM1-CM3$  y aglutinante  $K$ . Todas las muelas abrasivas van con una marca especial que caracteriza su calidad según su dureza, granulosisidad, aglutinante y clase de abrasivo, con indicación de velocidad circunferencial permisible sin averías de la muela.

Además, existen otras herramientas abrasivas como los discos abrasivos de corte y desbaste de acero o piedra, bloques de pulido, piedras de afilar guadañas, piedras de esmeril, piedras de esmeril convencionales de corindón normal, entre otras herramientas abrasivas (Figura 1, Figura 2 y Figura 3, del ANEXO 2) [5], [6], [7], [8].

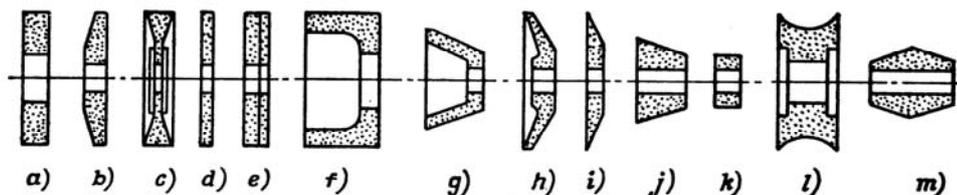


Figura 1.1. Formas de muelas abrasivas

## 1.2. Clasificación y propiedades de los materiales abrasivos

Los abrasivos son todos los materiales, productos químicos o naturales, cuya dureza es mayor que la del objeto a rayar.

Pueden presentarse en polvo, como mezclas con líquidos, mixtos, aglutinados con materiales de resinas sintéticas, aleaciones metálicas y/o montadas en soportes flexibles, rígidos, oscilantes y/o giratorios.

Pueden ser producidos para allanar, alisar o pulir mármol, piedra, granito, cerámica, vidrio, madera, acero y materiales varios, que precisen un acabado de sus superficies.

Cuando se habla o se piensa en el término “cerámico”, inmediatamente, se asocia a las artesanías, a la vajilla y a la porcelana. Sin embargo, dentro de los materiales de ingeniería las cerámicas o fases cerámicas abarcan una amplia variedad de sustancias. Para mencionar algunas: vidrio, ladrillos, piedra, concreto, porcelana esmaltada, materiales magnéticos no metálicos, refractarios y entre muchos otros, los abrasivos.

Vale decir, entonces, que la clasificación como material cerámico es amplia, a punto tal que se incluyen no solamente los óxidos y silicatos, sino también todos los materiales inorgánicos no metálicos como los carburos duros y grafitos.

La gran mayoría de los minerales cerámicos, pensándolos como fases, al igual que los metales, tienen estructuras cristalinas. En estas están presentes elementos metálicos y no metálicos con enlaces covalentes ó iónicos.

Las cerámicas son estructuras, que no tienen muchos electrones libres. Los electrones están compartidos con enlaces covalentes entre átomos adyacentes ó bien son transferidos de un átomo a otro para dar un enlace iónico.

Estos tipos de enlaces son los que dan a los materiales cerámicos una alta estabilidad. La temperatura de fusión, como promedio, es más alta que la de los materiales metálicos u orgánicos. Son más resistentes a la alteración química. En general son malos conductores, tanto eléctricos, como térmicos.

Las estructuras cristalinas son bastante complejas; lo cual sumado a la mayor resistencia de sus enlaces químicos, hacen lentas a las reacciones químicas cerámicas.

Toda esta digresión conduce a tener presente los siguientes conceptos:

- Los materiales cerámicos son compuestos de metales y no metales.
- Los abrasivos, como el SiC (carburo de silicio) y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de aluminio – corindón) son compuestos cerámicos.

- Las propiedades de los materiales cerámicos son producto de sus estructuras cristalinas.

En general, están caracterizados por sus elevadas resistencias al corte, con lo cual no son dúctiles. Por ende, tienen:

- Altas durezas y resistencias a la compresión.
- Alta sensibilidad a las fisuras.
- Baja resistencias a la fractura.

La dureza y la resistencia son importantes en algunos casos. Para evaluar la dureza, actualmente se utilizan ensayos de microdureza. Para los cerámicos, la dureza se puede definir como la resistencia a la acción de ser rayado.

Este concepto fue sobre el que se creó la escala de Mohs. “Método de rasguño de dureza Mohs”. Básicamente, se seleccionan (10) diez minerales, que van desde el diamante con valor (10) diez, hasta el talco con valor (1) uno. Los valores se escogen con base en una muestra de un número más alto que pudiera rayar a uno con un número menor. Es decir, el más alto raya al más bajo.

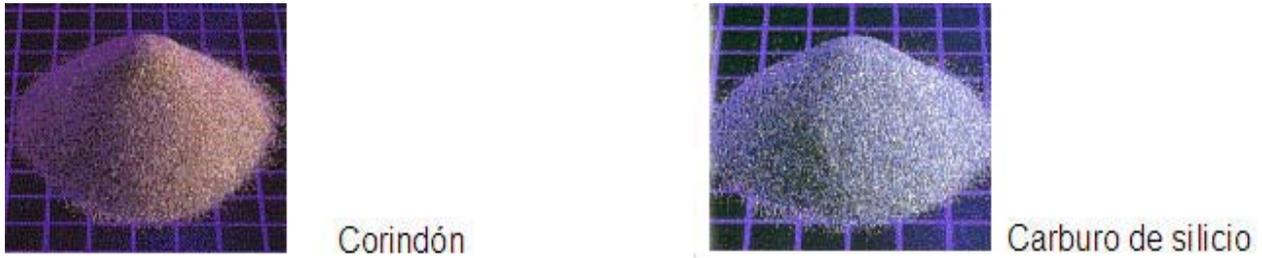
Este criterio permite entender por qué se aplican abrasivos (materiales cerámicos) para tallar un vidrio (otro material cerámico). Además, si se observa la escala de dureza, resaltan la ubicación del carburo de silicio, el corindón y el vidrio (Tabla 1).

El vidrio se desbasta con el carburo de silicio; se afina con el corindón y, finalmente, se pule con óxido de cerio.

*Tabla 1. Escala de dureza MOHS*

ESCALA DE MOHS DE DUREZA DE LOS MINERALES		
Dureza	Mineral	Equivalente diario
10	Diamante	Diamante sintético
Intermedio	<b>Carburo de silicio</b>	
9	<b>Corindón</b>	Rubi
8	Topacio	Papel abrasivo
7	Cuarzo	Cuchillo de acero
6	Feldespatos	Cortaplumas
5	Apatita	<b>Vidrio</b>
4	Fluorita	Clavo de hierro
3	Calcita	Moneda de bronce
2	Yeso	Uña de dedo
1	Talco	Polvo de talco

Existen varios tipos de materiales abrasivos (Figura 1.2), difundidos en la industria actual.



*Figura 1.2. Granos de Corindón y Carburo de silicio*

### **1.2.1. Tamaño de grano**

Además de la naturaleza química y cristalográfica, también es de suma importancia el tamaño de grano ó, mejor dicho, de la distribución de los tamaños de grano.

Es lógico pensar que no se preparan polvos, cuyos granos tengan una misma forma y tamaño. Por ejemplo, que sean esferas exactamente iguales. Por el contrario, cada polvo está constituido por granos, cuyos tamaños se extienden en magnitudes relativamente amplias.

En general, para todos los métodos de determinación o indicación de tamaño de grano se admite para los mismos una forma aproximadamente esférica, con lo cual es común ver que se hable de diámetro equivalente.

Para los polvos obtenidos mecánicamente, si se observan al microscopio, tienen formas muy irregulares y angulosas.

De todos los métodos para determinar el tamaño de grano, el que resulta directo, aunque muy laborioso es el examen microscópico. Este determina el tamaño real de los granos y del número de granos en una determinada magnitud. Pero este método resultaría antieconómico para ser empleado a nivel industrial, por lo que solo se emplea como método de control, junto a otros.

Los métodos indirectos se basan, parcialmente, en la determinación de la superficie total en un polvo (absorción de sustancias colorantes ó velocidad de disolución) y, en parte, en la velocidad de caída de los granos en el seno de un líquido o en un gas. Estos solventes, pueden estar en reposo o moverse en sentido opuesto a la dirección de caída (sedimentación).

Mientras la determinación de la superficie total arroja un valor medio del tamaño de grano, el análisis por sedimentación permite abarcar el total de la distribución de tamaños de granos. A su vez, permite dividir al polvo en fracciones y, por su tamaño, deducir la composición de los mismos.

El tamaño de grano usualmente se determina por el procesamiento estadístico de un análisis de distribución granulométrica, atendiendo a estándares. La media, mediana y curtosis, son parámetros estadísticos que se emplean para es estudio de distribuciones de clases de granos.

Los granos abrasivos de minerales triturados, calcinaciones, reacciones químicas, etc. se clasifican de acuerdo a su tamaño de grano. Es a partir de dicho tamaño que se define su granulometría [9].

Probablemente la propiedad más importante es la granulometría. Esta mide el tamaño del grano, basada en la determinación inversa del tamaño del grano. De esta manera cuanto mayor es la numeración, tanto menor será el tamaño del grano.

De esta forma puede usarse la siguiente relación entre aplicación y granulometría [10].

Desbaste Pesado: Granos 36, 40 y 50

Desbaste Leve: Granos 60, 80 y 100

Semi Terminado: Granos 120, 150 y 180

Terminado: Granos 220, 240 ,280 y 320

Pulido: Granos: 360,400, 500 600, 800

Para la clasificación (Tabla 1 y Tabla 2, ANEXO 1) de estos granos puede emplearse el método por tamizado, método normalizado y que en la industria es muy empleado. Los tamices se comercializan en juegos [11], y se trabajan en una tamizadota [12], pudiéndose definir el tamaño del grano entre un valor mínimo y uno máximo, según la granulometría con la que se quiere trabajar [13].

Además de las clasificaciones anteriores también pueden clasificarse (Tabla 2, ANEXO 1) de acuerdo al tamaño medio de los granos.

Como ha podido apreciarse cada medida de malla tiene un equivalente de designación; es decir, a medida que el número de la malla es más bajo, la medida del material es más gruesa.

### **1.2.2. Propiedades fundamentales de los granos abrasivos**

La **dureza** se puede definir como la resistencia a la acción del rayado. El ejemplo típico lo constituye el diamante (Tabla 1), en la escala de Mohs, que raya a todos, y el talco, que puede ser rayado por todos.

La **tenacidad** es la capacidad de los granos abrasivos de absorber energía. Esto significa que los granos deben resistir impactos bajo la acción de esfuerzos de choque y no pierden su capacidad de corte.

La **friabilidad** es la capacidad de los granos de fracturarse, cuando van perdiendo poder de corte, y durante el trabajo crear nuevas aristas de corte, generando así menos calor. A este fenómeno se le llama “autoafilado” del grano.

### **1.2.3. Normas**

Producto al desarrollo de la industria se ha ido realizando diversos trabajos y estos se han tenido que hacer acordes a pruebas e investigaciones, ya realizadas por otras personas. Es por eso que en el mundo se norman estos trabajos y resultados en forma de estándares, que es obligatorio cumplir para las nuevas generaciones de equipos y productos en la industria. Para el caso de los abrasivos se especifican las normas CAMI y FEPA.

La norma CAMI fue usada en los Estados Unidos por la asociación de fabricantes de abrasivos. Como toda Norma, el sistema y sus procedimientos fueron diseñados para determinar la uniformidad de sus productos. Esta Norma no tenía equivalencia hasta mediados de los años 70. En ese entonces, desde Europa se comenzó a comercializar productos hacia EEUU.

Frente a la oportunidad del negocio, nació la norma FEPA, que lleva su nombre de la Federación Europea de Fabricantes de Productos Abrasivos. Como era de esperar, utiliza un procedimiento distinto a la clasificación granulométrica de la norma CAMI.

En un principio, se comenzó a identificar a la FEPA anteponiendo una letra P antes del tamaño de grano. Por ejemplo, P120 es un grano 120, clasificado por la norma FEPA. Rápidamente, la norma tomó consideración comercial. La idea que se popularizó fue que era de excelente resultado, con una clasificación de tamaño de grano de mayores posibilidades de corte (Tabla 2). Es evidente que un grano más grueso debe cortar más y más rápido.



#### 1.2.4. Aglutinantes

Los granos abrasivos, deben estar unidos por medio de un aglutinante, que al mismo tiempo proporciona consistencia a la herramienta abrasiva. Actualmente se usan los aglutinantes siguientes:

- a) Inorgánicos.
  - Aglutinantes minerales compuestos por magnesia y silicatos.
  - Aglutinantes cerámicos.
- b) Orgánicos.
  - Aglutinantes vegetales constituidos por laca india, caucho, resina natural y artificial y aceites.

#### 1.2.5. Grado de dureza de las herramientas abrasivas

La dureza de las herramientas abrasivas no se determina por la dureza de sus granos, sino por la capacidad de su aglutinante para mantenerlos unidos durante el trabajo. El grado de dureza de la muela depende directamente de la composición y cantidad de material aglutinante, del proceso de fabricación y de las condiciones de su aglomeración.

Los granos abrasivos durante el rectificado se embotan por la acción de las fuerzas de corte, una vez que el grano se ha desprendido, el material aglutinante se desgasta rápidamente y cede el frente a otro grano, que se hallaba cubierto por el anterior. A este proceso se denomina “*auto afilado*” de la herramienta abrasiva. Eligiendo correctamente la muela adecuada (grado de dureza) y adoptando el régimen de trabajo adecuado, la muela trabajará durante un relativo más largo período de tiempo, que de no observarse estas precisiones.

Por su dureza, las muelas abrasivas pueden dividirse en categorías de dureza y subdivisiones (Tabla 4).

Tabla 4. Designación y categoría de dureza de las muelas abrasivas [14]

Designación	Categoría de dureza	Subdivisión de dureza
M	Muy blanda	M1, M2, M3.
CM	Blanda	CM1, CM2.
C	Semiblanda	C1, C2.
CT	Semidura	CT1, CT2, CT3.
T	Dura	T1, T2.
BT	Muy dura	BT1, BT2.
4T	Extraordinariamente dura	4T1, 4T2.

Los abrasivos con aglutinantes cerámicos y resinosos artificiales, se fabrican con todas las durezas indicadas en la tabla anterior, los de aglutinantes vulcanizados (caucho) son los comprendidos por la categorías *CM*, *C*, *CT*, y *T* [14].

### 1.2.6. Estructura

Para el empleo y fabricación de las muelas abrasivas es necesario que estas tengan determinada estructura y propiedades. Por estructura de una muela abrasiva puede definirse la relación cuantitativa entre las disposiciones relativas de los granos, el aglutinante y los poros, en la masa que constituye la muela. Los poros son las pequeñas cavidades de la muela, el volumen total de poros determina su porosidad. La estructura de una muela depende de la relación de volumen entre los poros, el aglutinante y los granos de abrasivo.

La estructura de las herramientas abrasivas se caracteriza por la razón numérica y el agrupamiento relativo de los granos, aglutinantes y cavidades en la unidad de volumen de la herramienta.

La estructura de una herramienta abrasiva es designada por números desde 0 hasta 12. Estas 13 estructuras están subdivididas en tres grupos (Figura 1.3).

1. Compacta; desde 0 a 3.
2. Semicompacta; desde 4 a 6.
3. Abiertas, desde 7 a 12.

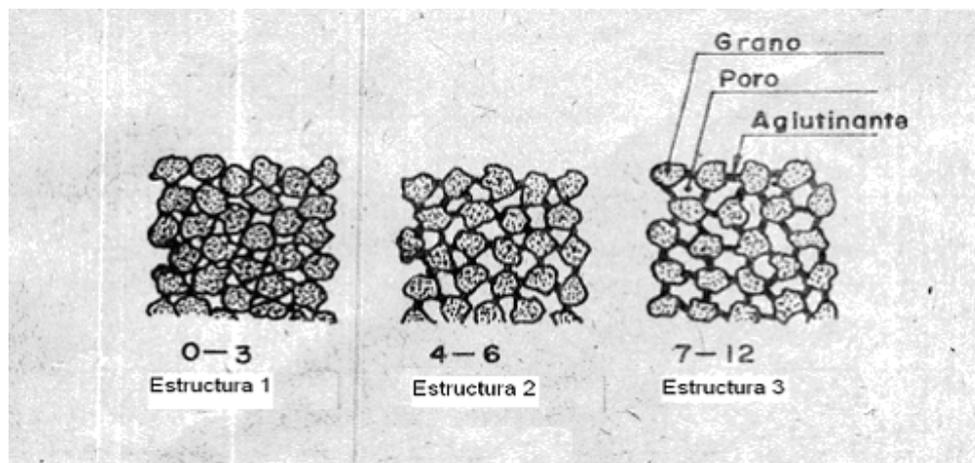


Figura 1.3 Estructuras de las herramientas abrasivas

El número de la estructura determina el espaciamiento de los granos; mientras más grande es el número, mayor es el espacio entre los granos.

Para seleccionar el uso de cada tipo de muela se debe recurrir a tablas o manuales, donde aparecen, para cada tipo de material, la muela que debe ser utilizada, así como el régimen de corte adecuado. No obstante, se puede señalar como criterio general, que las herramientas compactas se recomiendan para el maquinado de metales duros y frágiles y las herramientas con estructura abierta se emplean para el rectificado de metales blandos y dúctiles [14], [15].

Las muelas abrasivas cuentan con propiedades físico-mecánicas fundamentales, tales como:

- Dureza adecuada. La dureza de la muela depende del material a trabajar. Si la muela es demasiado dura ésta se embota con rapidez calentando a la pieza y, por el contrario, si es muy blanda, se gasta con rapidez. Se denomina dureza de la herramienta abrasiva a la capacidad del aglutinante de retener granos en la superficie resistiendo la influencia de las fuerzas externas en la superficie.
- Autoafilable. La capacidad de autoafilado de la muela no es más que el desprendimiento de los granos para dar lugar a otros de aristas más agudas.
- Alta resistencia a la fractura y al agrietamiento.
- Alta resistencia a la fuerza centrífuga.

En el caso de las limas cerámicas no es necesaria la alta resistencia a la fuerza centrífuga; sin embargo, debe considerarse la resistencia a la flexión y al impacto por posibles caídas durante su uso.

### **1.3. Materiales empleados en la fabricación de limas cerámicas**

Las limas cerámicas se construyen con diferentes tipos de abrasivos, como el carburo de silicio, el corindón y el diamante [16], [17]; además necesita de aglutinante o aglomerante, que tiene la misión de mantener el grano en las limas, piedras o muela abrasiva, hasta que se haya despuntado por el proceso de corte. Entonces, el aglomerante debe soltar el grano para dar lugar a un nuevo grano afilado. Esta propiedad se puede adaptar al proceso abrasivo correspondiente con el tipo de aglomerante y la cantidad del mismo.

Estas herramientas se fabrican con diferentes grupos de aglomerantes, dentro de ellos están los aglomerantes cerámicos (letra **V**) y aglomerantes resinoides (letras **RE**).

Los aglomerantes cerámicos se componen de caolín, cuarzo, feldespato y fibras de vidrio. Mezclando estos componentes se puede ajustar la característica del aglomerante. Los aglomerantes cerámicos son químicamente resistentes frente a los aceites y las emulsiones,

pero frágiles y sensibles a los choques. El desgaste del aglomerante lo produce la presión abrasiva.

Los aglomerantes resinoides se fabrican principalmente con base de resina fenólica. Dentro de este tipo de aglomerantes se distinguen los aglomerantes sin relleno y con relleno. Variando las resinas fenólicas y los rellenos se ajustan las propiedades del aglomerante. El desgaste de aglomerante se lleva a cabo mediante el calor que se origina durante el amolado y la presión abrasiva. Los aglomerantes resinoides se adecuan, por su elasticidad, al rectificado de pulido y de precisión, así como al desbaste y al rectificado en seco. Al utilizar emulsiones se debe prestar atención a que el valor de pH no se encuentre considerablemente por encima de 9, ya que, de lo contrario, pueden atacar el aglomerante resinoides.

El abrasivo y el aglomerante se mezclan, en base a una receta prefijada, y pasan por un proceso de prensado y de tratamiento térmico, cuyos parámetros dependen de la documentación técnica establecida para cada caso [15].

#### **1.4. Consideraciones sobre el precio de las herramientas abrasivas**

Las herramientas abrasivas se producen en grandes escalas, pues su costo de producción se hace relativamente barato. Sin embargo, los productos que utilizan como abrasivos, aglutinantes y el consumo de energía para la sinterización, en ocasiones pueden encarecer las herramientas.

Los bloques de pulido poseen un precio entre 4,08 € y 12,92 € [18], [19]. Los discos de corte, que necesitan de menos material, tienen precios entre 20 € y 32 €, atendiendo a la forma el tamaño y sus componentes [20], [21], [22].

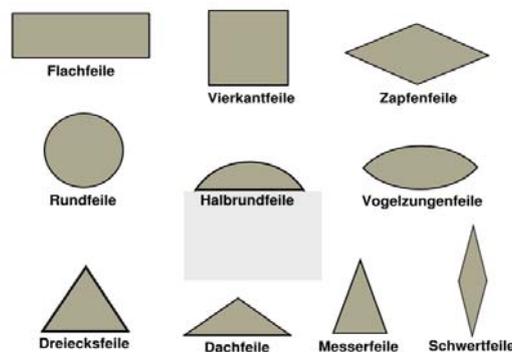
#### **1.5. Formas de las limas cerámicas. Moldes y procedimiento de fabricación**

La lima abrasiva es una herramienta manual de corte consistente en una barra cerámica compacta, que se usa para desbastar y afinar todo tipo de piezas metálicas, de plástico o de madera. Es una herramienta básica en los trabajos de ajuste.

Las limas pueden ser de diversas formas y granulados. Si se hace una división [23], según su sección o geometría (Figura 1.4), pueden dividirse en:

- **Limas planas:** con igual anchura en toda su longitud o con la punta ligeramente convergente: las superficies de corte pueden ser las dos caras y los cantos, pero también las hay sin corte en los cantos, es decir lisos, y que permiten trabajar en rincones en los que interesa actuar tan sólo sobre un lado y respetar el otro.

- **Limas de media caña:** Tienen una cara plana y otra redondeada, con una menor anchura en la parte de la punta. Son las más utilizadas, ya que se pueden utilizar, tanto para superficies planas, como para rebajar asperezas y resaltes importantes o para trabajar en el interior de agujeros de radio relativamente grande.
- **Limas redondas:** son las que se usan si se trata de pulir o ajustar agujeros redondos o espacios circulares.
- **Limas triangulares:** sirven para ajustar ángulos entrantes e inferiores a 90 °. Pueden sustituir a las limas planas.
- **Limas cuadradas:** Se utilizan para trabajar chaveteros, o agujeros cuadrados



*Figura 1.4: Formas de limas*

Hoy en día se construyen limas de cerámicas o piedras de esmeril, que tienen como ventaja la posibilidad de cambiarles sus características y propiedades variando su estructura y forma [16], [5], [6], [7], [8].

## 1.6. Ensayos de abrasividad

Para valorar los tipos de ensayos realizados a las limas abrasivas se evalúan normas correspondientes a ensayos de abrasividad (Tabla 3, Anexo 1).

Se refieren diferentes ensayos para medir la abrasividad en materiales, que emplean un durómetro para moldes y machos de ensayos en seco (Figura 4, ANEXO 2), un durómetro de ensayo en verde (Figura 5, ANEXO 2), pista de desgaste para pavimento (Figura 6, ANEXO 2), ensayo de los Ángeles (Figura 7, ANEXO 2), que estudia el tamaño de las partículas antes y después de girar dentro de un cilindro con pala en su interior, pesando la probeta antes y después del ensayo [24]. También se refiere un método estudio de desgaste mediante el uso de una bola deslizante linealmente reciprocante sobre superficie lisa (Figura 8, ANEXO 2) [25]. Además de estos ensayos de abrasividad se emplea el ensayo CERCHAR

[26] (Figura 9, ANEXO 2), ensayo que más se ajusta a las características del uso de las limas abrasivas. En la literatura también se refieren otros ensayos, como el ensayo de abrasión en elastómeros (Figura 10, ANEXO 2) [27], el ensayos de desgaste (Figura 11, ANEXO 2) [28] y el ensayo de abrasión (Figura 12, ANEXO 2) [29].

### 1.7. Desgaste

Teniendo en cuenta que al evaluar la abrasividad de la limas se produce un desgaste entre la probeta y el patrón es por eso que se dedica este epígrafe a definir algunos puntos importantes, que se van a tener en cuenta en el ensayo.

El desgaste es un proceso complejo que se produce en las superficies de los cuerpos sólidos debido a la fricción de otro cuerpo o medio; trayendo por consecuencia la variación de la macro y microgeometría superficial; de la estructura; y de las propiedades de las capas superficiales, con o sin pérdidas de material.

#### Mecanismo del desgaste

Las altas tensiones que surgen en las áreas reales de contacto y la temperatura que producto de la fricción se genera predefinen, para cualquier par tribológico los siguientes mecanismos básicos de enlace (agarre) superficial: Mecánico, Térmico, Químico, y adhesivo (Figura 1.5).

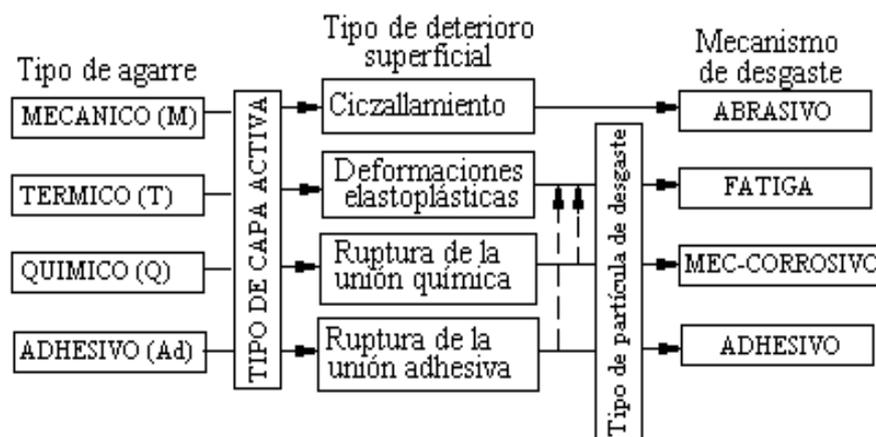


Figura 1.5: Relación entre el tipo de agarre y el mecanismo de desgaste

#### Indicadores del desgaste

La determinación cuantitativa del desgaste ha sido de interés para la mayoría de los tribólogos de diferentes épocas, ya que ello permitiría incorporar a los cálculos de diseño el efecto de la fricción y el desgaste. Sin embargo, este es un problema no resuelto en la

actualidad debida en lo fundamental a que sobre ambos influyen toda una serie de factores relacionados con las condiciones de explotación, la naturaleza de los cuerpos en contacto y las condiciones del medio.

Los avances alcanzados por la tribología han establecido determinados parámetros que caracterizan al desgaste. Estos parámetros se reconocen como indicadores del desgaste y permiten evaluar, estudiar, caracterizar y diagnosticar el desgaste. En dependencia del método empleado para la determinación de los valores absolutos del desgaste el mismo puede ser: Lineal ( $W_h$ ), gravimétrico ( $W_g$ ) o volumétrico ( $W_v$ ).

El desgaste de los elementos de máquinas se produce con o sin pérdida de material, es por ello que la evaluación de la magnitud del mismo se puede cuantificar o expresar por diferentes indicadores:[30, 31]

1. Desgaste lineal ( $W_h$ ,  $\mu\text{m}$ ).
2. Desgaste volumétrico ( $W_v$ ,  $\text{mm}^3$ ).
3. Desgaste gravimétrico ( $W_g$ ,  $\text{mg}$ ).
4. Resistencia al desgaste ( $W_d$ ).
5. Resistencia relativa al desgaste ( $W_r$ ).
6. Velocidad o razón de desgaste ( $W'$ ):

### **1.8. Cemento Portland P- 350**

La fabricación del cemento Portland se da en tres fases: (I) Preparación de la mezcla de las materias primas; (II) Producción del clinker; y, (III) Preparación del cemento.

La Norma Cubana NC 54-204 establece los términos y definiciones sobre el cemento Portland. Este producto se clasifica en tres grados de calidad de acuerdo a la resistencia a la compresión, expresada en  $\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-2}$  y se designa con las letras que inician el nombre, separadas por un guión del valor numérico de la resistencia a la compresión a los 28 días [32, 33]. Así por ejemplo:

- a) Cemento Portland 350: Cemento P-350
- b) Cemento Portland 450: Cemento P-450
- c) Cemento Portland 550: Cemento P-550

No obstante, existen en Cuba otras normas para las especificaciones de calidades de cementos, entre las cuales pueden citarse.

NC 95:2001 Cemento Portland. Especificaciones.

NC 96:2001 Cemento con Adición Activa. Especificaciones.

NC 97:2001 Cemento de Albañilería. Especificaciones.

NC 98:2001 Cemento Resistente a los Sulfatos. Especificaciones.

NC 99:2001 Cemento de Moderado y Bajo Calor de Hidratación. Especificaciones.

NC 100:2001 Cemento Pórtland de Alta Resistencia Inicial. Especificaciones.

NC 101:2001 Cemento Pórtland Blanco. Especificaciones.

## 1.9. Conclusiones Parciales de Capítulo I

1. Las limas de mano son herramientas cuyo material constitutivo convencional es el acero; sin embargo, actualmente se comercializan limas conformadas por abrasivos aglutinados, fundamentalmente para el afilado de útiles de labranza.
2. Industrialmente se emplean distintos tipos de abrasivos; sin embargo, la escoria obtenida como subproducto del proceso de reducción aluminotérmica de la pirolusita, que contiene 60 % de corindón y 35 % de galaxita, no se encuentra dentro de ellos, a pesar de constituir un potencial material abrasivo de herramientas destinadas al desbaste. No obstante, no se ha reportado su uso, ni las proporciones entre sus componentes, como tampoco se ha demostrado su efectividad para la elaboración de limas cerámicas.
3. Se ha demostrado la posibilidad del empleo de mezclas de cemento Pórtland P-350 y agua, en una relación entre 0,4 y 0,6, como aglutinante de morteros cerámicos empleados en la elaboración de pequeñas herramientas abrasivas con vástago y de piedras de esmeril para el pulimento de piso; sin embargo, no ha sido demostrada su efectividad en la fabricación de limas cerámicas, debido a su endeble geometría y complejo régimen de trabajo.
4. Existen diversos procedimientos de ensayo de abrasividad, que pueden emplearse en la evaluación de herramientas abrasivas; sin embargo, el que más semeja las condiciones de explotación de las limas cerámicas es el método de "CERCHAR". No obstante, este método tiene la limitante de ser un procedimiento manual, cuyo accionamiento mecánico no controla la regularidad del movimiento alternativo para cada lima evaluada, pudiendo afectar en cierta medida, la reproducibilidad y la repetitividad experimental en los resultados obtenidos.

## Capítulo II: Desarrollo de limas cerámicas

### 2.1. Selección de los materiales

Las escorias (Tabla 5), obtenidas como subproducto del proceso de reducción aluminotérmico de la pirolusita, procedente del yacimiento “Margarita de Cambute”, en Santiago de Cuba, está formada fundamentalmente por 60 % de corindón u óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y 35 % de galaxita o aluminato de manganeso ( $MnAl_2O_4$ ) [34, 35].

Tabla 5: Composición química de las escorias resultantes del proceso de reducción aluminotérmico de la pirolusita (%)

$Al_2O_3$	58,5	$Fe_2O_3$	2,5	MgO	8,87	C	0,065	SrO	0,12
MnO	22,2	$Cr_2O_3$	0,19	BaO	0,51	$Na_2O$	0,69	S	0,039
$SiO_2$	7,8	CaO	2,1	$K_2O$	0,28	$TiO_2$	0,16		

Una vez concluido el proceso aluminotérmico, todo el material (metal y escoria) contenido en el reactor, se vierte en agua. Por choque térmico se enfrían y fragmentan el metal y la escoria y por técnicas de separación se obtiene el metal aislado. Las escorias son trituradas en un molino de mandíbula, que las reduce hasta granulometrías de 3 mm, aproximadamente, y posteriormente un molino de martillo tritura estos materiales hasta granulometrías por debajo de 1 mm.

La dureza de esta escoria se encuentra entre 7,5 a 9 [36], considerando la escala de Mohs, lo cual la hace apta para considerarla como material abrasivo, potencialmente aplicable a la elaboración de herramientas [37].

El cemento Portland P-350, se emplea comúnmente para la elaboración de morteros. Las limas cerámicas aglutinadas con cemento pudieran considerarse tipos especiales de morteros (Epígrafe 1.8). Pruebas realizadas, sobre herramientas abrasivas especiales, han demostrado su capacidad de aglutinación, suficiente como para resistir velocidades angulares de más de 3000 rpm [38].

El tamaño de la clase granulométrica del abrasivo a emplear se selecciona para el desbaste (Tabla 3, Epígrafe 1.2.1) de herramientas de labranza, por lo que se escoge para un número de grano 36 (Tabla 1, ANEXO 1), los tamaños de grano entre 0,630 y 0,500 mm.

## 2.2. El Cemento Pórtland P-350 (aglutinante)

El cemento Portland es el tipo de aglutinante más utilizado para la preparación del hormigón o concreto. Fue inventado en 1824 en Inglaterra por el albañil Joseph Aspdin. El nombre se debe a la semejanza en su aspecto con las rocas encontradas en Portland, una isla del condado de Dorset.

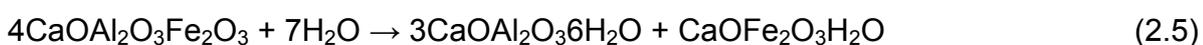
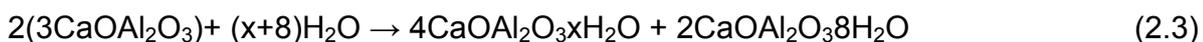
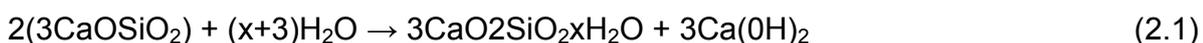
Desde el punto de vista químico se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través de la calcinación de carbonatos, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones.

Las materias primas para la producción del cemento Portland P-350 son minerales que contienen óxido de calcio (44 %), óxido de silicio (14,5 %), óxido de aluminio (3,5 %), óxido de hierro (3 %) y óxido de magnesio (1,6 %).

El cemento obtenido tiene una composición formada por: 64 % óxido de calcio; 21 % óxido de silicio; 5,5 % óxido de aluminio; 4,5 % óxido de hierro; 2,4 % óxido de magnesio; 1,6 % sulfatos y 1 % otros materiales, entre los cuales se encuentra principalmente el agua.

Cuando el cemento Portland P-350 es mezclado con el agua, el producto solidifica en menos de una hora (45 min) y endurece progresivamente durante un período de varias semanas. El endurecimiento inicial es producido por la reacción del agua, yeso y aluminato tricálcico, formando una estructura cristalina de calcio-aluminio-hidrato, estringita y monosulfato. El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato tricálcico formando una estructura amorfa llamada calcio-silicato-hidrato. En ambos casos, las estructuras que se forman envuelven y fijan los granos de los materiales presentes en la mezcla. Una última reacción produce el gel de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Las tres reacciones generan calor (exotérmicas).

Las reacciones de hidratación, que forman el *proceso de fraguado* son:



Estas reacciones son todas exotérmicas. La más exotérmica es la hidratación de  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ , seguida de la de  $3\text{CaOSiO}_2$ , luego  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$  y finalmente  $2\text{CaOSiO}_2$  [39].

El cemento como producto es un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, manejable y plástica capaz de fraguar y endurecer al reaccionar con el agua y adquiriendo por ello consistencia pétreo, el hormigón o concreto. Su uso está muy generalizado, siendo su principal función la de aglutinante.

Se pueden establecer dos **tipos básicos de cementos**:

1. De origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente;
2. De origen puzolánico: la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad y, por lo tanto, por sus destinos y usos.

El tipo de cemento más utilizado, como aglomerante para la preparación del hormigón o concreto, es el **cemento Portland**.

Con el agregado de materiales particulares al cemento (calcáreo o cal) se obtiene el cemento plástico, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

Como cemento hidráulico tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material con relativamente buenas propiedades aglutinantes.

La calidad del cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150.

Los cementos **Portland especiales** son los cementos, que se obtienen de la misma forma que el Portland, pero que tienen características diferentes a causa de variaciones en el porcentaje de los componentes que lo forman.

El cemento **Portland férrico** es un tipo de cemento especial caracterizado por un módulo de fundentes de 0,64. Esto significa que este cemento es muy rico en hierro. En efecto se obtiene introduciendo cenizas de pirita o minerales de hierro en polvo. Este tipo de composición posee por lo tanto, además de una mayor presencia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , una menor presencia de  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ , cuya hidratación es la que desarrolla más calor. Por este motivo estos cementos son particularmente apropiados para ser utilizados en climas cálidos. Los mejores cementos férricos son los que tienen un módulo calcáreo bajo, en efecto estos

contienen una menor cantidad de  $3\text{CaOSiO}_2$ , cuya hidratación produce la mayor cantidad de cal libre ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Puesto que la cal libre es el componente mayormente atacable por las aguas agresivas, estos cementos, conteniendo una menor cantidad, son más resistentes a las aguas agresivas.

Contrariamente a los cementos férricos, los **cementos blancos** son cementos especiales que tienen un módulo de fundentes muy alto, aproximadamente 10. Estos contienen, por lo tanto, un porcentaje bajísimo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . El color blanco es debido a la falta del hierro, que le da una tonalidad grisácea al Portland normal y un gris más oscuro al cemento férrico. La reducción del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  es compensada con el agregado de fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y de criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), necesarios en la fase de fabricación en el horno. Existen cuatro tipos de calidades de cemento: tipo I (52:5); tipo II (52:5); tipo II (42:5) y tipo II (32:5); también llamado pavi). Se le suele añadir una adición extra de caliza, que se le llama "*clinkerita*" para rebajar el tipo, ya que normalmente el "*clinker*" molido con yeso, produciendo el tipo I.

Los **cementos de mezclas** se obtienen agregando al cemento Portland normal otros componentes como la puzolana. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características, que lo diferencian del Portland normal.

El **Cemento puzolánico** lleva su nombre por una fina ceniza volcánica que se extiende principalmente en la región del Lazio y la Campania, su nombre deriva de la localidad de Pozzuoli, en las proximidades de Nápoles, en las faldas del Vesubio. Posteriormente se ha generalizado a las cenizas volcánicas en otros lugares. Ya Vitrubio describía cuatro tipos de puzolana: negra, blanca, gris y roja.

Mezclada con cal (en la relación de 2 a 1) se comporta como el cemento puzolánico, y permite la preparación de una buena mezcla en grado de fraguar incluso bajo agua.

Esta propiedad permite el empleo innovador del hormigón, como ya habían entendido los romanos: El antiguo puerto de Cosa fue construido con puzolana mezclada con cal apenas antes de su uso y colada bajo agua, probablemente utilizando un tubo, para depositarla en el fondo sin que se diluya en el agua de mar. Los tres muelles son visibles todavía, con la parte sumergida en buenas condiciones después de 2100 años.

La puzolana es una piedra de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa y puede obtenerse a bajo precio. Un cemento puzolánico contiene aproximadamente de 55 a 70 % de clinker Portland, de 30 a 45 % de puzolana y de 2 a 4 % de yeso.

Puesto que la puzolana se combina con la cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), se tendrá una menor cantidad de esta última. Pero justamente porque la cal es el componente que es atacado por las aguas

agresivas, el cemento puzolánico será más resistente al ataque de éstas. Por otro lado, como el  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$  está presente solamente en el componente constituido por el clinker Portland, la colada de cemento puzolánico desarrollará un menor calor de reacción durante el fraguado. Este cemento es, por lo tanto adecuado, para ser usado en climas particularmente calurosos o para coladas de grandes dimensiones.

El **Cemento siderúrgico** se obtiene por la sustitución de la puzolana, en muchos casos, por la ceniza de carbón proveniente de las centrales termoeléctricas, escoria de fundiciones o residuos obtenidos calentando el cuarzo. Estos componentes son introducidos entre el 35 hasta el 80 %. El porcentaje de estos materiales puede ser particularmente elevado, siendo que se origina a partir de silicatos, es un material potencialmente hidráulico. Esta debe, sin embargo, ser activada en un ambiente alcalino, es decir en presencia de iones  $\text{OH}^-$ . Es por este motivo que debe estar presente por lo menos un 20 % de cemento Portland normal. Por los mismos motivos que el cemento puzolánico, el cemento siderúrgico también tiene buena resistencia a las aguas agresivas y desarrolla menos calor durante el fraguado. Otra característica de estos cementos es su elevada alcalinidad natural, que lo rinde particularmente resistente a la corrosión atmosférica causada por los sulfatos.

El **cemento de fraguado rápido**, también conocido como "cemento romano ó prompt natural", se caracteriza por iniciar el fraguado a los pocos minutos de su preparación con agua. Se produce en forma similar al cemento Portland, pero con el horno a una temperatura menor (1 000 a 1 200 °C). Es apropiado para trabajos menores, de fijaciones y reparaciones, no es apropiado para grandes obras porque no se dispondría del tiempo para efectuar una buena colada. Aunque se puede iniciar el fraguado controlado mediante retardantes naturales (E-330) como el ácido cítrico, pero aún así inicia el fraguado aproximadamente a los 15 minutos (temperatura a 20 °C). La ventaja es que al pasar aproximadamente 180 minutos de iniciado del fraguado, se consigue una resistencia muy alta a la compresión (entre 8 a 10 MPa), por lo que se obtiene gran prestación para trabajos de intervención rápida y definitivos. Hay cementos rápidos que pasados 10 años, obtienen resistencia a la compresión superior algunos hormigones armados (pasan en la gráfica a los 60 MPa).

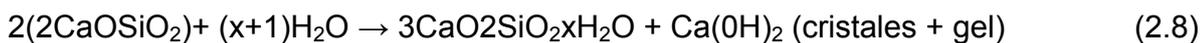
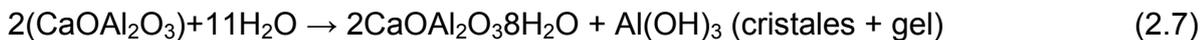
El **cemento aluminoso** se produce a partir principalmente de la bauxita con impurezas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Adicionalmente se agrega calcáreo o bien carbonato de calcio. El cemento aluminoso, también llamado «cemento fundido», por lo que la temperatura del horno alcanza hasta los 1 600 °C y se

alcanza la fusión de los componentes. El cemento fundido es colado en moldes para formar lingotes, que serán enfriados y finalmente molidos para obtener el producto final.

El cemento aluminoso está compuesto por 35-40 % de óxido de calcio; 40-50 % de óxido de aluminio, 5 % de óxido de silicio, 5-10 % de óxido de hierro y 1 % de óxido de titanio. Se refieren sus componentes reales: 60-70 %,  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ ; 10-15 %,  $2\text{CaOSiO}_2$ ;  $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ .

El óxido de silicio constituye una impureza, que tiene que ser menor al 6 %, porque el componente al que da origen ( $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ ) tiene pocas propiedades hidrófilas (poca absorción de agua).

### Reacciones de hidratación en los cementos



Mientras el cemento Portland es un cemento de naturaleza básica, gracias a la presencia de cal  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , el cemento aluminoso es de naturaleza sustancialmente neutra. La presencia del hidróxido de aluminio  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , que en este caso se comporta como ácido, provoca la neutralización de los dos componentes y da como resultado un cemento neutro.

El cemento aluminoso debe utilizarse con temperaturas inferiores a los  $30^\circ\text{C}$ , por lo tanto en climas fríos. En efecto, si la temperatura fuera superior, la segunda reacción de hidratación cambiaría y se tendría la formación de  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (cristales cúbicos) y una mayor producción de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , lo que llevaría a un aumento del volumen y podría causar fisuras [40, 41],

Se definen los **morteros** de cemento como la masa constituida por árido fino, cemento y agua. Eventualmente, puede contener algún producto de adición para mejorar alguna de sus propiedades [42]. Las limas cerámicas aglutinadas con cemento constituirían tipos especiales de morteros, donde el árido fino es reemplazado por el abrasivo.

### 2.3. Fabricación de los moldes

El molde para mortero requiere de condiciones especiales: Debe ser no absorbente, desarmable y manuable. Para la fabricación del molde se usa madera calafateada (Figura 13, ANEXO 2), unida con tornillos, que permiten desarmarlo y extraer la lima cerámica en verde. Entre la pared del molde y el mortero preparado debe colocarse una interfase celulósica. La lima en verde se moldea sobre un tablero no absorbente, que la sostendrá hasta su traslado al proceso de curado.

Las dimensiones del molde se toman de acuerdo a las medidas de la lima o “piedra INDIA” rectangular (38 × 13 × 150 mm), de acuerdo a recomendaciones del catálogo UNCETA [43], las que se tienen en cuenta para la confección del molde.

### 2.4. Diseño experimental

Para la investigación se usa un diseño de relaciones, donde se emplean las variables independientes en por ciento de agua ( $X_1$ ), de cemento ( $X_2$ ) y de abrasivo ( $X_3$ ) (Tabla 6). La relación se establece entre el agua y el cemento ( $R_1$ ) y el abrasivo y el cemento ( $R_2$ ). Estas relaciones son tratadas como un diseño factorial completo (Tabla 7), añadiendo como tercer factor independiente el tiempo de curado ( $t$ ).

Se ha determinado que la relación cemento-arena se sitúa entre 0,4 y 0,6 para la arena seca [44].

Los rangos de los factores independientes del diseño de experimento se toman para el agua,  $12 \% \leq X_1 \leq 15 \%$ ; para el cemento,  $25 \% \leq X_2 \leq 30 \%$  y para el abrasivo,  $60 \% \leq X_3 \leq 90 \%$ . El tiempo de curado se toma entre  $15 \leq X_4 \leq 30$ , por lo que entonces se calculan las relaciones (Tabla 7).

Relaciones	$r_1 = \frac{X_1}{X_2}$	$r_2 = \frac{X_3}{X_2};$	(2.9)
------------	-------------------------	--------------------------	-------

Despejando	$X_1 = r_1 \times X_2$	$X_3 = r_2 \times X_2$
------------	------------------------	------------------------

Entonces se toma	$X_1 = r_1 \times X_2$
------------------	------------------------

$\frac{1}{X_2} = \frac{r_1}{X_1} \rightarrow R$	$X_1 = \frac{r_1}{R}; X_2 = \frac{1}{R}; X_3 = \frac{r_1}{R}$	(2.10)
---	---	--------

Ahora bien, teniendo en cuenta la condición de normalidad, se puede plantear que:

$$\sum (X_1 + X_2 + X_3) = 1 \Leftrightarrow \sum (r_1 X_2 + X_2 + r_2 X_2) = 1 \Leftrightarrow X_2 (r_1 + r_2 + 1) = 1$$

$$r_1 + r_2 + 1 = \frac{1}{X_2} \Leftrightarrow r_1 + r_2 + 1 = R \quad (2.11)$$

Por tanto, cumpliendo la condición de normalidad, se define:

$$r_{1\text{ MAX}} = \frac{X_{1\text{ MAX}}}{X_{2\text{ MIN}}} \qquad r_{2\text{ MAX}} = \frac{X_{3\text{ MAX}}}{X_{2\text{ MIN}}}$$

$$r_{1\text{ MIN}} = \frac{X_{1\text{ MIN}}}{X_{2\text{ MAX}}} \qquad r_{2\text{ MIN}} = \frac{X_{3\text{ MIN}}}{X_{2\text{ MAX}}}$$

**Tabla 6: Datos del diseño**

Componente	Código	Niveles		Nivel medio	Tipo de relación	Máx./min.	X1=r1/R	X2=1/R	X3=r2/R	Cant. a preparar (g)
		Mínimo	Máximo							
Agua	X1	12	15	13,5	r1max	0,6	Factorial completo			170
Cemento	X2	25	30	27,5	r1min	0,40	Dos niveles			
Abrasivo	X3	60	90	75	r2max	3,60	tres factores (r1; r2; t)			
Tiempo	t	15	30	116	r2min	2,00				

**Tabla 7: Planteamiento del diseño experimental**

Diseño de relaciones				Relaciones			Combinación de ambos diseños			
							Agua (%)	Cemento (%)	Abrasivo (%)	Tiempo (días)
Nº	r1	r2	T	r1	r2	R	X1	X2	X3	X4
1	-	-	-	0,4	2	3,4	11,7647	29,4118	58,8235	15
2	+	-	-	0,6	2	3,6	16,6667	27,7778	55,5555	15
3	-	+	-	0,4	3,6	5	8,0000	20,0000	72,0000	15
4	+	+	-	0,6	3,6	5,2	11,5384	19,2308	69,2308	15
5	-	-	+	0,4	2	3,4	11,7647	29,4118	58,8235	30
6	+	-	+	0,6	2	3,6	16,6667	27,7778	55,5555	30
7	-	+	+	0,4	3,6	5	8,0000	20,0000	72,0000	30
8	+	+	+	0,6	3,6	5,2	11,5384	19,2308	69,2308	30

El diseño de experimento se ajusta entre los valores de 0,4 y 0,6 de relación agua y cemento, ya que se ha demostrado que los moneros de cemento mantienen reconocidas propiedades de abrasividad entre estos dos valores [45], [41], [46].

Para ajustar la cantidad de cada material al volumen que se necesita se calculan (Tabla 8) las proporciones que cumplan con las cantidades de mezcla del diseño (Tabla 7).

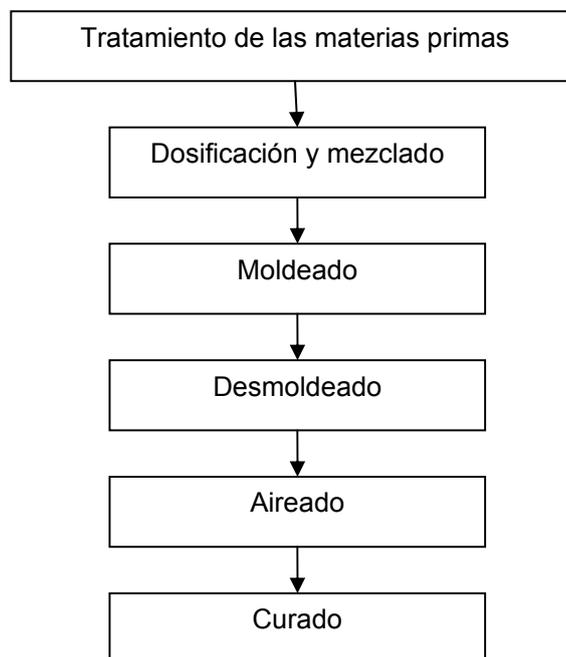
*Tabla 8. Cantidad de sustancia en el experimento y la relación agua/cemento*

Relación agua/cemento ( $0,4 \leq A/C \leq 0,6$ )	Nº	Cantidad de la sustancia en el experimento a realizar, en gramos			Total	Tiempo (días)
		Agua	Cemento	Abrasivo		
0,4	1	20,00	50,00	100,00	170	15
0,6	2	28,33	47,22	94,44	170	15
0,4	3	13,60	34,00	122,40	170	15
0,6	4	19,62	32,69	117,69	170	15
0,4	5	20,00	50,00	100,00	170	30
0,6	6	28,33	47,22	94,44	170	30
0,4	7	13,60	34,00	122,40	170	30
0,6	8	19,62	32,69	117,69	170	30

## 2.5. Procedimiento Experimental

### 2.5.1 Elaboración de las limas abrasivas

La elaboración de las limas abrasivas (Figura 2.1) consta de seis etapas independientes.



*Figura 2.1: Procedimiento de elaboración de limas cerámicas a escala de laboratorio*

El **tratamiento de las materias primas** consiste en la trituración, tamización, mezclado y almacenamiento de las materias primas, hasta la fecha de ensayo experimental. La

trituration se realiza en un molino de bolas, hasta tamaños, aproximadamente, al promedio de la clase de grano requerida, en lotes independientes, para evitar la pérdida de material por sobre trituración. El abrasivo triturado y tamizado es homogenizado durante 20 minutos en una mezcladora homogenizadora húngara modelo Tabor. La forma inclinada de operación de la mezcladora permite la homogenización de tamaños y composiciones químicas de granos diferentes dentro de la masa total de abrasivo tratada. Aún cuando el abrasivo vítreo empleado (Epígrafe 2.1) no es higroscópico, se almacena en un recipiente cerrado, para que el agua potencialmente adherida a la superficie no pueda alterar la relación agua cemento establecida para cada punto experimental.

La **dosificación** se realiza empleando una balanza digital Sartorius, con precisión hasta las milésimas de gramo. El mezclado se realiza a mano en dos etapas, para cada lima preparada, empleando una cucharilla dentro de un mortero de ágata, evitando incorporación a la mezcla del material del recipiente. Primeramente se mezclan durante 2 minutos los materiales secos (cemento y abrasivo); posteriormente se adiciona el agua y se mezclan nuevamente durante 3 minutos, hasta preparar el mortero.

Para realizar el **moldeado** se coloca el molde sobre el tablero; sobre éste y dentro del molde, se inserta una interfase de celulosa. Se vierte el mortero preparado sobre la interfase, cuidando de que, al llenar toda la capacidad del molde, copie fielmente sus dimensiones. El mortero se comprime con una fuerza de 100 N y se enraza posteriormente.

El **desmoldeado** se realiza desarmando el molde mediante los tornillos, cuidando de no promover la unión entre los granos de la lima en verde. El tiempo, que transcurre, entre el moldeado y el desmoldeado depende de la cantidad de agua empleada. Para los puntos 2 y 6 (Tabla 19), el tiempo de fraguado antes del desmoldeado debe ser superior a 30 minutos. Para los restantes puntos experimentales, el desmoldeado puede ser inmediatamente que se termina de rellenar el molde. La diferencia radica en la cantidad de agua que posee cada mezcla.

Las limas son **aireadas** durante dos días (24 horas) antes de ser sometidas al proceso de curado, planificado en el diseño experimental. El aireado se realiza a una humedad (80 %) y temperaturas ambientes (25 °C) sobre el tablero donde se elaboran.

El **curado** se desarrolla sumergiendo las limas en un recipiente con agua a temperatura ambiente (25 °C). El nivel de agua debe sobrepasar la altura de las limas, solamente en 1/3 de la longitud de estas.

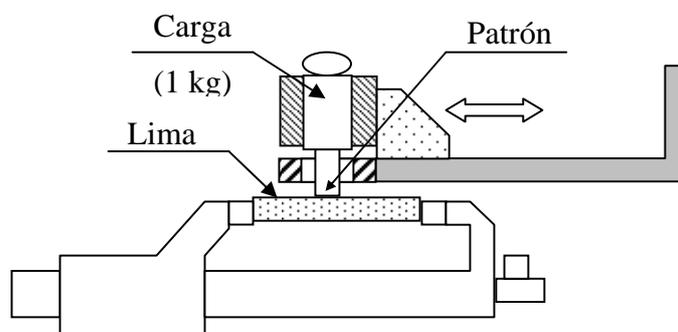
Considerando que las limas podrían confundirse en el proceso de elaboración y, sobre todo, de curado, fueron marcadas convenientemente según un código (Tabla 9) preestablecido.

*Tabla 9: Código para identificar las limas*

N <sup>o</sup>	Ensayo	Replica 1	Replica 2	Días
	<b>F</b>	<b>A</b>	<b>N</b>	
<b>F</b>	FF	FA	FN	15
<b>L</b>	LF	LA	LN	15
<b>N</b>	NF	NA	NN	15
<b>P</b>	PF	PA	PN	15
<b>Q</b>	QF	QA	QN	30
<b>S</b>	SF	SA	SN	30
<b>V</b>	VF	VA	VN	30
<b>Z</b>	ZF	ZA	ZN	30

### **2.5.2 Equipamiento para el ensayo de abrasividad**

Considerando el dispositivo (Figura 9, ANEXO 2) de accionamiento manual, para la realización del ensayo de abrasividad CERCHAR (Epígrafe 1.6), se decide diseñar un dispositivo (Figura 2.2; Figura 14 y Figura 15 (ANEXO 2) y el ANEXO 3, cuyo accionamiento mecánico pueda controlar la regularidad del movimiento alternativo para cada lima evaluada, permitiendo la reproducibilidad y la repetitividad experimental en los resultados obtenidos.



*Figura 2.2: Dispositivo de abrasividad*

La máquina herramienta denominada limadora o recortador modelo 7B35, está destinada para trabajar con cuchillas de superficies planas o disformes en posición horizontal, vertical e inclinada con una longitud máxima de 500 mm y también para mortajar toda clase de canales rectilíneos, hendiduras y ranuras.

El movimiento recíprocante del recortador, con la combinación sostenida del peso sobre el patrón de acero (Figura 14, ANEXO 2), simula la acción del trabajo de la lima.

Este principio de funcionamiento garantiza un mecanismo ejecutor, que cumple con los parámetros necesarios para el ensayo, al permitir aprovechar las ventajas del dispositivo (Figura 2.2) y la regulación de velocidad de la máquina mortajadora.

La lima a evaluar se coloca en una mordaza, que va anclada con bridas de la mesa. El movimiento recíprocante se realiza con el cabezal del recortador, donde se coloca al portaherramientas el dispositivo diseñado. El patrón de acero a desgastar se aloja en el interior del dispositivo (Figura 2.2), ejerciéndose sobre este una carga constante de un (100 N). El patrón es de acero 45 normalizado, de la colada 190 de la fundición de la Planta Mecánica, de Santa Clara (Tabla 10). Su composición química se obtiene como promedio de tres ensayos en el equipo Espectrolad, cito en dicha empresa.

*Tabla 10: Composición Química y dureza de la colada 190*

Colada	Carbono (%)	Silicio (%)	Manganeso (%)	Fósforo (%)	Azufre (%)	Cromo (%)	Níquel (%)	Dureza Brinell
190	0,468	0,321	0,41	0,018	0,019	0,27	0,26	180

### **2.5.3 Metodología del ensayo**

Para la realización y evaluación de los resultados del ensayo de abrasión se emplea un método comparativo, justificado al emplear la misma metodología y equipamiento para todas las limas evaluadas. Los resultados se muestran en la Tabla 4, (ANEXO 1), que considera el peso inicial y final, de las limas y las probeta, además del tiempo de duración del ensayo.

El procedimiento de ensayo cuenta de los siguientes pasos:

Primero: Se organiza el puesto de trabajo, que consta de una mesa, sobre la cual se colocan las limas, que se van a ensayar, y la balanza analítica modelo "Sartorius"; el dispositivo, que se coloca en el portaherramientas del recortador, verificándose el ajuste y el ángulo de la mordaza, que sostiene la lima. Por último, se ajusta la máquina a un régimen de trabajo de 71 doble carreras por minuto y una longitud real de recorrido de 124 mm (velocidad media de  $17,61 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ).

Segundo: Se prepara el ensayo, para lo cual se limpian bien, con una brocha, la lima y se pesa. Al igual que ésta, el patrón se limpia, pero con un paño y alcohol. Se anota el peso de

estas, y se montan sobre el dispositivo. Para comenzar se ajusta el cronómetro en cero y se conecta simultáneamente con el movimiento recíprocante del portaherramientas del recortador. El tiempo de duración del ensayo es de 15 minutos, al final del cual, coordinadamente se detiene el cronómetro y la máquina, garantizando una longitud total de ensayo de  $(15 \text{ min} \cdot 17,61 \text{ m} \cdot \text{min}^{-2}) 264,15 \text{ m}$ .

Tercero: Luego de haber terminado el ensayo se vuelve a limpiar la lima, con una brocha, y el patrón, con un paño y alcohol, para retirar cualquier partícula, que quede adherida en sus superficies. Posteriormente se procede a pesar nuevamente la lima y la probeta.

Este procedimiento es aplicado a todas las muestras a ensayar.

#### **2.5.4 Cálculos de desgastes**

El **Desgaste por diferencia de peso ( $W_g$ ; en gramos)** se utiliza cuando se quiere apreciar cuánto fue el desgaste ocurrido sobre la probeta ensayada. Se calcula por la Ecuación 2.12.

$$W_g = P_{\text{Inicial}} - P_{\text{Final}} \quad (2.12)$$

El **Desgaste lineal ( $W_h$ , en metros)** se utiliza cuando los valores absolutos del desgaste son de medianos a altos y está fundamentado en la medición de las dimensiones de las piezas antes y después del ensayo de desgaste, la exactitud de este método depende de la calidad de los medios de medición que se utilicen. Para la determinación de los valores absolutos del desgaste mediante este método se utilizan instrumentos, tales como calibres interiores y exteriores, dispositivos mecánicos de palancas, dispositivos ópticos, microscopios instrumentales y universales, bloques planos paralelos, micrómetros exteriores e interiores, indicadores de carátula, etc. Conociendo el desgaste lineal se determina la intensidad lineal del desgaste ( $I_h$ ), la cual calcula por la Ecuación 2.13.

$$I_h = \frac{W_h}{S_f} \quad (2.13)$$

El **Desgaste volumétrico ( $W_v$ , en milímetros cúbicos)** se fundamenta en la medición del volumen antes y después del proceso de desgaste. Es también usado con frecuencia y, al igual que el indicador anterior, requiere de medios de medición de alta precisión. Este generalmente se determina partiendo del indicador lineal del desgaste. Se calcula por la Ecuación 2.14.

$$W_v = W_h A_n \quad (2.14)$$

El **Desgaste gravimétrico ( $W_g$ , en metros por gramos)** se utiliza para la determinación del desgaste de piezas de pequeñas dimensiones las cuales se pesan antes y después del desgaste. Antes del pesaje las piezas deben ser lavadas y secadas o sacudidas adecuadamente para eliminar partículas, polvos, los productos de desgaste, grasas y otros. Se calcula por la Ecuación 2.16.

El grado de exactitud de este método depende de la exactitud de las balanzas. Este método no se recomienda en los casos en que las dimensiones de las piezas cambian no solo como resultado del desprendimiento de partículas de la superficie de los materiales, sino también debido a las deformaciones plásticas, así como para la determinación del desgaste de materiales porosos bajo regímenes de fricción lubricada. La intensidad del desgaste se determina por la Ecuación 2.15.

$$I_g = \frac{W_g}{S_f} \quad (2.15)$$

En la práctica industrial resulta beneficioso transformar el desgaste gravimétrico (perdida de masa) en desgaste lineal (variación de dimensiones). Lo anterior se basa en el hecho de que en la mayoría de los casos los pares tribológicos están formados por materiales de diferentes pesos específicos. La relación entre el indicador gravimétrico y lineal del desgaste se expresa en la Ecuación 2.16.

$$I_g = I_h = \frac{W_g}{A_n S_f 10^8 \gamma} \quad (2.16)$$

Donde:

$W_g$  - desgaste por diferencia de peso (mg)

$A_n$  - área normal de la superficie de contacto ( $\text{cm}^2$ )

$\gamma$  - peso específico del material  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

S- Recorrido de fricción en km

La **Resistencia relativa al desgaste ( $W_r$ )** es la relación que existe entre el desgaste de la muestra, que se está ensayando, y el patrón de referencia, que puede ser el establecido por la norma o el tomado como referencia durante los estudios. Se calcula por la Ecuación 2.17.

$$W_r = \frac{W_m}{W_p} \quad (2.17)$$

La **Velocidad o razón de desgaste (W')** mide el ritmo del proceso de desgaste y no es más que la relación que existe entre el desgaste y el tiempo en que este ha tenido lugar.[30, 31]

$$W^I = \frac{W_h}{t} \quad (2.18)$$

### **Densidad de la lima**

La densidad de la lima puede estimarse a partir de las densidades de sus componentes iniciales, suponiendo ausencia de reacción química entre ellos.

Este cálculo (Ecuación 2.18 y Ecuación 2.19) se realiza multiplicando la masa de cada uno de los componentes de la lima por su respectiva densidad picnométrica. En este caso solo se consideran las densidades picnométricas del abrasivo, [3] y la del cemento Pórtland, [47], [48], puesto que se considera que el agua se evapora y “no altera” las densidades picnométricas (Tabla 11) de la lima terminada.

$$V = m \cdot \rho \quad (2.18)$$

$$\rho_{TOTAL} = \frac{(\% (g)_{CEMENTO} \cdot \rho_{CEMENTO}) + (\% (g)_{ABRASIVO} \cdot \rho_{ABRASIVO})}{100\%} \quad (2.19)$$

Tabla 11: Densidades de los prototipos de limas preparados para el diseño experimental

Material	Densidad picnométrica (g·cm <sup>-3</sup> )	Valores de los distintos tipos de mezclas en el diseño			
Cemento	3,15				
Abrasivo	2,801				
Variantes o combinaciones consideradas, Tabla 13		F y Q	L y S	N y V	P y Z
Densidad picnométrica (g·cm <sup>-3</sup> )		2,57	2,43	2,65	2,55

### 2.5.5 Relación entre las diferencias de desgaste relativo (REDDR)

En este trabajo se pretende evaluar conjuntamente los dos factores de desgaste, tanto el de la lima (probeta), como el del acero (patrón). Para ello se calcula la relación que existe entre los dos desgastes relativos (Ecuación 2.20) teniendo en cuenta que el más importante es el desgaste del patrón. Los resultados se muestran en la Tabla 12.

$$REDDR = \frac{\frac{mi_P - mf_P}{mi_P}}{\frac{mi_L - mf_L}{mi_L}} = \frac{\Delta m_P}{\Delta m_L} \quad (2.20)$$

Donde:

REDDR – Relación entre las diferencias de desgaste relativo.

$mi_P$  - masa inicial del patrón

$mf_P$  - masa final del patrón.

$mi_L$  - masa inicial de la probeta

$mf_L$  - masa final de la probeta

Tabla 12: Resultados del cálculo de la relación entre las diferencias de desgaste relativo

No	Clasificación según	Ensayo		Replica 1		Replica 2	
	Días de curado	Código asumido	Relación obtenida	Código asumido	Relación obtenida	Código asumido	Relación obtenida
1	15	FF	5,8927	FA	6,1872	FN	5,5982
2	15	LF	0,9807	LA	1,0509	LN	1,0158
3	15	NF	0,1151	NA	0,1083	NN	0,1220
4	15	PF	0,4816	PA	0,4709	PN	0,4922
5	30	QF	2,4543	QA	2,2824	QN	2,1106
6	30	SF	1,5514	SA	1,7883	SN	2,0253
7	30	VF	0,0984	VA	0,0918	VN	0,1050
8	30	ZF	0,7152	ZA	1,5434	ZN	2,3716

## 2.6. Elaboración de las probetas para el ensayo Charpy

Para evaluar la resistencia de las limas cerámica se fabrican probetas con las dimensiones para el ensayo de resistencia al impacto (Charpy) [49, 50] con el mismo código, con que se identificaron las limas en el diseño experimental, para evaluar el desgaste (Tabla 9).

El molde se construye, de forma tal, que cumpla con los requisitos y las medidas de la probeta para ensayo charpa. Este molde se elabora de madera, aluminio y dos tornillos con tuercas para su desarme.

La elaboración de las probetas para este ensayo consta de cinco etapas independientes, que se realizan de la misma forma, que se emplea para la elaboración de las limas de cerámicas (Epígrafe 2.5.1).

Se emplean, al igual que para la elaboración de las limas (Tabla 8), las proporciones de las mezclas, según el diseño de experimento (Tabla 6 y Tabla 7), donde cambiando la cantidad total y aplicando la regla de proporciones, se puede obtener la cantidad de masa a emplear para cada componente. Este procedimiento matemático se planifica en una hoja de Microsoft Excel, mejorando la precisión y rapidez en la obtención de los resultados (Tabla 13).

*Tabla 13: Cantidad de sustancia en el experimento y la relación agua/cemento*

Relación agua/cemento ( $0,4 \leq A/C \leq 0,6$ )	Nº	Cantidad de la sustancia en el experimento a realizar, en gramos			Total	Tiempo en días
		Agua	Cemento	Abrasivo		
0,4	1	2,94	7,35	14,71	25	15
0,6	2	4,17	6,94	13,89	25	15
0,4	3	2,00	5,00	18,00	25	15
0,6	4	2,88	4,81	17,31	25	15
0,4	5	2,94	7,35	14,71	25	30
0,6	6	4,17	6,94	13,89	25	30
0,4	7	2,00	5,00	18,00	25	30
0,6	8	2,88	4,81	17,31	25	30

### 2.6.1. Equipamiento para el ensayo de Impacto.

Las probetas se ensayan en una máquina de ensayo de choque con péndulo con efecto de percusión de 10/40 cm·kg, que permite una medición, acorde con las características del material a ensayar (Figura 17, ANEXO 2).

Esta máquina de ensayo de resistencia al choque con péndulo sirve para determinar la resistencia a la flexión por choque de materiales sintéticos, así como para examinar su solidez y tenacidad.

La maquina basa su funcionamiento en el principio de Chapy. El martillo de péndulo oscila alrededor del eje en cojinetes alojados en el bastidor. El martillo de péndulo puede ser reemplazado, lo que permite ensayar, con la misma precisión, materiales de diferentes tenacidades. Luego de romper el cuerpo de ensayo, el martillo de péndulo continúa oscilando debido a la impulsión de la energía restante. Lleva consigo un puntero arrastrado, el que indica en la escala, en cm·kg, la energía necesaria para la rotura del material.

En la tabla 14 pueden apreciarse los datos técnicos de esta máquina y sus dimensiones.

*Tabla 14: Datos técnicos y sus dimensiones*

Capacidad de trabajo del martillo del péndulo, resp.				10 y 40 cm·kg
División de la escala, respectivamente.				0,1 y 0,4 cm·kg
Precisión de medición				± 1
Ajustabilidad de los apoyos				40 a 70 mm
Radio del redondeado del canto de ataque				3 mm
Angulo diedro del canto de ataque				45 <sup>0</sup>
Máximo corte transversal del cuerpo de ensayo				10 × 15 mm
Tipo	Dimensiones en milímetros			Peso kg
	Largura	Anchura	Altura	
AS-107	280	210	450	Neto 25
Dimensiones de la caja apr.	480	390	570	Bruto 38

## **2.7. Conclusiones Parciales del Capítulo II**

1. El diseño experimental de relaciones permite combinar variables de mezclas, mientras que el diseño factorial completo, variables de proceso. La combinación de ambos tipos de diseño puede permitir estudiar factores, tanto de mezclas, como de procesos, resultando adecuada, con un mínimo de experimentos (8 corridas) para la evaluación de la relación agua, cemento y abrasivo de la mezcla, que compone las limas, y el tiempo de fraguado, necesario para la aceleración del acabado de las limas.
2. La combinación de los métodos de ensayo CERCHAR y el de la bola deslizante linealmente recíprocante sobre superficie lisa permite diseñar y emplear un nuevo método de ensayo de abrasividad, que cumpla con los requisitos de aplicación real para el trabajo de la lima.
3. El dispositivo diseñado para el ensayo de desgaste abrasivo permite regular una carga constante sobre el patrón, garantizando reproducibilidad y repetitividad en las condiciones de los ensayos al evaluar las muestras de limas.
4. Los moldes desarmables permiten un desmoldeo adecuado de las limas y de las probetas en verde para los ensayos de desgaste y de ensayo Charpy, respectivamente, con la productividad experimental necesaria, evitando pérdidas de agua durante la conformación de la mezcla.

### **Capítulo III: Desarrollo de limas cerámicas**

#### **3.1. Resultados de cálculo de desgaste**

Según los tipos de desgaste (Epígrafe 2.5.4) se realizan los cálculos para determinar el desgaste por diferencia de peso ( $W_g$ ), la intensidad lineal del desgaste ( $g/cm^2$ ), el Desgaste volumétrico ( $W_v$ ), el desgaste gravimétrico ( $W_g$ ), la resistencia relativa al desgaste ( $W_r$ ) y la velocidad o razón de desgaste ( $W'$ ) (Tabla 5 y Tabla 6, ANEXO 1).

La intensidad lineal del desgaste se utiliza cuando los valores absolutos del desgaste son de medianos a altos (Epígrafe 2.5.4). En el caso estudiado, los niveles de intensidad lineal de desgaste son inferiores a 0,9 mg por metro para el patrón, en todas las muestras evaluadas (Tabla 6, ANEXO 1), los cuales son relativamente pequeños. Considerando que otros indicadores de desgaste ofrecen resultados más diferenciables, no se recomienda este ha emplear como indicador, para evaluar la abrasividad de las limas.

Para la evaluación del desgaste volumétrico (Ecuación 2.14) se requiere incorporar la densidad de las muestras evaluadas (Ecuación 2.19). Este aspecto puede incorporar aproximaciones al determinarse la densidad de las limas (Epígrafe 2.5.4). Al existir indicadores más precisos para evaluar la abrasividad de las limas, se decide no procesar estadísticamente estos resultados. Esta misma consideración, pero con respecto al peso específico, se aplica al desgaste gravimétrico (Ecuación 2.16).

La velocidad o razón de desgaste (Ecuación 2.18) mide el ritmo del proceso de desgaste y no es más que la relación que existe entre el desgaste y el tiempo en que este ha tenido lugar (Epígrafe 2.5.4). En el ensayo practicado el tiempo en el que están sometidas las muestras es el aproximadamente el mismo (máximo = 15min 00 '42''; mínimo = 14min 59' 43''; promedio = 15min 00 '23'') (Tabla 4, ANEXO 1). Al dividir las magnitudes de desgaste entre los relativos tiempos de ensayo, los resultados no son sustancialmente diferentes y sí muy inferiores a los obtenidos por la diferencias de peso entre las muestras iniciales y finales (desgaste gravimétrico). Esto hace que no sea recomendable este método para evaluar diferencias entre las limas, cuando existen otros parámetros que ofrecen diferencias más marcadas.

De todas las determinaciones el desgaste por diferencia de peso (Ecuación 2.12) permite obtener magnitudes adimensionales, que relacionadas (lima-patrón) pueden ofrecer resultados importantes.

## 3.2. Criterios estadísticos sobre el diseño de experimento

### 2.5.1 Relación entre las diferencias de desgaste relativo

Tal como se explica en el Capítulo 2, la Resistencia relativa al desgaste ( $W_r$ ) es la relación que existe entre el desgaste de la muestra, que se está ensayando, y el patrón de referencia, que puede ser el establecido por la norma o el tomado como referencia durante los estudios. Sin embargo, esta determinación considera el desgaste como absoluto, al considerar la diferencia de masas iniciales y finales solamente. Este aspecto no conduce a soluciones adecuadas, cuando las muestras a comparar parten de masas iniciales diferentes. Para evitar esta inconsistencia se calcula el desgaste relativo ( $Gr$ ), tal que la diferencia de masas ( $m_i - m_f$ ) se divida entre la masa inicial ( $m_i$ ), tanto para el patrón como para la lima. Luego, se obtiene como Relación de Resistencia Relativa al Desgaste, el cociente de los desgastes relativos.

Por otra parte, la función a optimizar en el experimento es el desgaste en el patrón, que se convierte en el objeto de labranza a trabajar. Es decir, mientras más se desgaste, mejor resultado ofrece la lima. Luego, la Relación de Resistencia al Desgaste Relativo debe plantearse como el cociente del desgaste relativo ( $Gr_p$ ) del patrón dividido por el de la lima ( $Gr_l$ ).

Los valores de este cálculo se ofrecen en la Tabla 12, procesados con el programa Statgraphics.

La Tabla 7, (ANEXO 1) muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones. También se muestra el error normal o de muestreo de cada uno de los efectos. El Gráfico de Pareto (Figura 18, ANEXO 2) se emplea para probar la significación estadística de los efectos, y la Tabla de ANOVA (Tabla 8, ANEXO 1) para el análisis de varianza para REDDR.

El gráfico de Pareto muestra la influencia marcada de la variable independiente relación agua cemento, así como la influencia de la interacción con la de abrasivo cemento. Se aprecia que la variable independiente “tiempo de curado” no influye significativamente, al igual que sus interacciones.

La Tabla de ANOVA divide la variabilidad de relación entre las diferencias de desgaste relativo (REDDR) en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. En este caso, 5 de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0 % de nivel de confianza.

La Tabla 15 muestra que el estadístico  $R^2$  indica que el modelo así ajustado explica el 92,63 % de la variabilidad en REDDR. El estadístico  $R^2$  ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 90,03 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,613506. El error absoluto de la media (MAE) de 0,441138 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es inferior a 0,05, hay indicios de una posible correlación de serie. Estos parámetros indican que el modelo es estadísticamente adecuado para explicar el comportamiento de la función dependiente Desgaste Relativo, considerando que el proceso de elaboración de las muestras es semindustrial.

*Tabla 15: Estadístico R-cuadrado.*

R- cuadrado	= 92,6299 por ciento
R- cuadrado (ajustado para g.l.)	= 90,0286 por ciento
Error Estándar de Est.	= 0,613506
Error absoluto de la media	= 0,441138
Estadístico Durbin-Watson	= 2,78498 (P=0,0117)
Autocorrelación residual Lag 1	= -0,427356

Del gráfico (Figura 19, ANEXO 2) se aprecia una influencia marcada en el efecto de la variable independiente de “relación abrasivo cemento” ( $R_2$ ), y prácticamente insignificante en la de “tiempo de curado” (t). En todos los casos, su incremento conduce a la disminución de la variable dependiente estudiada.

En la Tabla 16 se muestran los coeficientes de regresión para la relación entre las diferencias de desgaste relativo (REDDR).

*Tabla 16: Coeficientes de regresión para REDDR*

Constante	= 39,4211
A: Relación Agua Cemento	= -56,3527
B: Relación Abrasivo Cemento	= -8,7971
C: Tiempo de curado	= -0,71149
AB	= 11,2226
AC	= 0,910228
BC	= 0,0808924

La ecuación de la regresión que se ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{REDDR} = 39,4211 - 56,3527 \cdot R_1 - 8,7971 \cdot R_2 - 0,71149 \cdot t + 11,2226 \cdot R_1 \cdot R_2 + 0,910228 \cdot R_1 \cdot t + 0,0808924 \cdot R_2 \cdot t$$

Siendo los valores de las variables especificados en sus unidades originales.

La Tabla 9 (ANEXO 1) contiene información sobre los valores de REDDR que se han generado usando el modelo ajustado. La tabla incluye:

- (1) el valor observado de REDDR (si hay)
- (2) el valor pronosticado de REDDR utilizando el modelo ajustado
- (3) 95,0% límites de confianza para la respuesta media

Cada ítem corresponde a los valores de los factores experimentales en una fila específica de su fichero de datos.

En Tabla 15 se muestra la ruta ascendente, donde se pueden observar los valores pronosticados de REDDR. Este es el camino del centro de la región experimental actual a lo largo de la cual la respuesta estimada varía rápidamente con una variación mínima en los factores experimentales. En las Figuras 20 y 21 (ANEXO 2) se pueden ver las superficies y contornos de respuestas estimadas, que indican las localizaciones buenas para ejecutar experimentos adicionales si se requirieran. Se generan 6 puntos cambiando Relación Agua Cemento en incrementos de 1,0.

*Tabla 15: Ruta ascendente para REDDR*

Relación A Agua cemento	Relación A Abrasivo cemento	Tiempo de Curado (Días)	Pronosticado REDDR
0,5	2,8	22,5	1,65222
1,5	9,61953	86,3108	155,798
2,5	17,0255	147,914	661,499
3,5	24,4493	209,271	1519,14
4,5	31,8787	270,545	2728,65
5,5	39,3107	331,777	4290,01

La Tabla 16 muestra la combinación de niveles de los factores que maximizan a REDDR por encima de la región indicada.

*Tabla 16: Respuesta Optimizada*

Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
Relación Agua Cemento	0,4	0,6	0,4
Relación Abrasivo Cemento	2,0	3,6	2,0
Tiempo de curado	15,0	30,0	15,0
Meta	maximizar REDDR		
Valor Optimo	= 5,47967		

Los resultados del ensayo de la relación entre las diferencias de desgaste relativo (REDDR) demuestran un crecimiento de esta propiedad con la disminución de las relaciones de agua/cemento y abrasivo/cemento. Cuando la relación agua/cemento crece, lo puede hacer a partir del crecimiento de la cantidad de agua o a partir del decrecimiento del cemento en la mezcla. En ambos casos la masa relativa de agua es superior con el aumento de la relación, produciendo un exceso de ésta en la mezcla, sobresaturándola. Este efecto de sobresaturación, además de alargar el proceso de fraguado, produce limas, en las cuales los granos no afloran a la superficie. Es decir, la lima se obtiene con mayor distancia intergranular, pero rellena (pre-embotada). Esta estructura tiende a disminuir la capacidad de corte, al impedir el afloramiento de los filos cortantes de los granos a la superficie, a la vez que no permite que los granos se desprendan, después de haber perdido su capacidad de corte (no se autoafila la lima).

### **2.5.2 Resultados del diseño con los valores del ensayo de impacto**

El ensayo de impacto o el llamado ensayo de resistencia Charpy se realiza con el objetivo de evaluar la resistencia a la rotura, ya que las limas de cerámica serán destinadas al trabajo agrícola, que conlleva a posibles caídas y golpes. El terreno y la superficie donde puedan caer las limas influye, pues no es lo mismo un piso de tierra, donde exista hierba, que un piso de losa o de concreto. Teniendo en cuenta este aspecto se valora realizar un ensayo estandarizado.

Para la evaluación del ensayo se realizaron probetas, con las mismas mezclas y proporciones (Epígrafe 2.5.6), que las empleadas para la fabricación de las limas para los ensayos de abrasividad.

Después de la elaboración de las probetas, a cada una se le mide el alto y largo, tres veces, se le determina la media y a estos valores resultantes y se determina el área promedio de

cada probeta.

El resultado del ensayo de impacto o energía de impacto se obtiene en kg·cm, que al dividirlo entre la sección transversal de cada probeta y multiplicándolo  $\times 10^{-2}$ , se obtiene en  $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ , el cual se introduce para el tratamiento estadístico – matemático en el Statgraphics (Tabla 10, ANEXO 1).

La Tabla 11, del ANEXO 1, muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones para la función respuesta de “resistencia al impacto”. También se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo. Las estimaciones, en orden decreciente de importancia, se traza en el Gráfico de Pareto (Figura 22, ANEXO 2). Para probar la significación estadística de los efectos se realiza una prueba de ANOVA (Tabla 12, ANEXO 1), que permite un análisis de varianza para el ensayo de impacto.

La Tabla de ANOVA divide la variabilidad del Ensayo de impacto en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. En este caso, 4 de los efectos tienen los p-valores inferiores a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0 % de nivel de confianza.

En la Tabla 17, se muestra los valores del estadístico  $R^2$ , que indica que el modelo así ajustado explica el 91,93 % de la variabilidad en Ensayo de impacto. El estadístico  $R^2$  ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 89,08 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 0,339212. El error absoluto de la media (MAE) de 0,226667 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es inferior a 0,05, hay indicios de una posible correlación de serie.

*Tabla 17: Estadístico R-cuadrado.*

R- cuadrado	= 91,9304 por ciento
R- cuadrado (ajustado para g.l.)	= 89,0823 por ciento
Error Estándar de Est.	= 0,339212
Error absoluto de la media	= 0,226667
Estadístico Durbin-Watson	= 2,54751(P=0,0454)
Autocorrelación residual Lag 1	= -0,292753

Del gráfico (Figura 23, ANEXO 2) se aprecia una influencia marcada en el efecto de la variable independiente de relación “agua cemento” (R1) y el “tiempo de fraguado” (t) mientras que la relación “abrasivo cemento” prácticamente es insignificante.

En la Tabla 18 se muestran los coeficientes de regresión para el ensayo de impacto donde la ecuación de la regresión queda ajustada a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Ensayo de impacto} = 0,68 + 3,75 \cdot R1 - 1,9 \cdot R1 + 0,198167 \cdot t + 4,45833 \cdot R1 \cdot R2 - 0,46 \cdot R1 \cdot t - 0,0104167 \cdot R2 \cdot t$$

*Tabla 18: Coeficientes de regresión para Ensayo de Impacto*

Constante	= 0,68
A: Relación Agua Cemento	= 3,75
B: Relación Abrasivo Cemento	= -1,9
C: Tiempo de curado	= 0,198167
AB	= 4,45833
AC	= - 0,46
BC	= -0,0104167

La Tabla 13 (ANEXO 1), contiene información sobre los valores de Ensayo de impacto, que se han generado usando el modelo ajustado. La tabla incluye:

- 1.- El valor observado de Ensayo de impacto (si hay)
- 2.- El valor pronosticado de Ensayo de impacto utilizando el modelo ajustado
- 3.- 95,0 % limites de confianza para la respuesta media

Cada ítem corresponde a los valores de los factores experimentales en una fila específica de su fichero de datos.

En la Tabla 14 (ANEXO 1), se muestra la ruta ascendente. Este es el camino del centro de la región experimental actual a lo largo de la cual la respuesta estimada varía rápidamente con una variación mínima en los factores experimentales. En la Figura 24 y Figura 25 (ANEXO 1) indican localizaciones buenas para ejecutar experimentos adicionales si fuera necesario. Actualmente, se han generado 6 puntos cambiando “Relación Agua Cemento” en incrementos de 1,0.

La Tabla 19 muestra la combinación de niveles de factores que maximizan el Ensayo de impacto por encima de la región indicada.

*Tabla 19: Respuesta Optimizada*

Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
Relación Agua Cemento	0,4	0,6	0,6
Relación Abrasivo Cemento	2,0	3,6	3,6
Tiempo de curado	15,0	30,0	15,0
Meta	Maximizar Ensayo de impacto		
Valor Optimo	= 3,99		

Los resultados del ensayo comparativo de impacto, a partir de la energía absorbida por las probetas, muestran un crecimiento de la propiedad con el incremento de las relaciones agua/cemento y abrasivo/cemento. El incremento del agua produce un completamiento de las reacciones de hidratación, que forman el proceso de fraguado, lo cual conduce a un incremento paulatino de la resistencia en las probetas, para el intervalo de relación agua/cemento estudiado. Cuando crece la relación abrasivo/cemento, se observa un crecimiento menos marcado, en el entorno estudiado, con relación al incremento observado cuando se aumenta la relación agua/cemento. El decremento de la cantidad de cemento o el aumento de la cantidad de abrasivo conduce a la disminución del espacio cubierto por el aglutinante, quedando la resistencia de la lima a expensas de la resistencia mayoritaria de la unión cemento grano. Este fenómeno eleva relativamente poco la resistencia mecánica de la unión, pero sí lo suficiente como para fortalecer la resistencia del mortero preparado.

Considerando que la función más importante a atender es la de la capacidad cortante de la lima, expresada por la relación entre las diferencias de desgaste relativo entre el patrón y la lima, es que se enfatiza en ésta propiedad para seleccionar la composición de la lima adecuada: la preparada para el punto 1 del diseño de experimento.

### **3.3. Criterios económicos sobre la fabricación de las limas abrasivas.**

La presente valoración tiene como objetivo principal, evaluar la factibilidad de realizar la producción de una pequeña cantidad de limas de cerámicas, en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UCLV.

Las instalaciones existentes actuales en el Centro de Investigación de Soldadura (CIS), de la facultad de Ingeniería Mecánica (FIM), UCLV, permiten la fabricación de 16 limas diarias, con un solo molde. Trabajándose 24 días/mes, durante 11 meses/año, pueden producirse 4224 limas/año.

Para la valoración económica se considera que el material abrasivo se compra a 500 \$/ton (Tabla 20) [1]. En su valoración económica, autores [1] consideran los gastos en materiales,

energía, transportación y mano de obra. Estos aspectos pueden considerarse para la elaboración limas de cerámicas abrasivas.

Para la evaluación económica se tomó como referencia la mezcla preparada para el punto 1 del diseño de experimento, ya que se tuvo en cuenta el mejor resultado del análisis estadístico de las variables dependientes relación entre las diferencias de desgaste relativo y resistencia al impacto.

Comunicaciones personales, referidas por la Empresa Provincial de Construcción y Mantenimiento (EPCM) Villa Clara, manifiestan que 3,5 ton de cemento, cuestan 275,35 CUP. Los costos por recargo de facturación (8,09 %), de comercial (3,92 %) y por transportación (7,67 %) son de 22,27 CUP, 3,92 CUP y 21,12 CUP, respectivamente, para un total de 329,54 CUC. Como 1 t son 20 sacos, 3,5 t equivalen a 70 sacos de cemento. Luego, puede deducirse entonces, que para un saco de cemento el costo asciende a 4,71 CUP.

Los costos de energía se valoran teniendo en cuenta la situación actual del país. La mano de obra, transportación, etc. se asumen, según reportes de autores consultados [1, 2] .

*Tabla 20: Datos utilizados para la valoración económica de la producción de limas de cerámicas*

Concepto		Consumo al año	Precio		Consumo (\$)
			CUC	CUP	
Materias primas	Abrasivo (Corindón y galaxita)	0,422 t	500 CUC/t	-	211 CUC
	Cemento Pórtland P-350	0,211 t	-	4,71	23,55CUP
	Agua	0,085 t			
Transportación		0,633 t	4,58	19,72	2,9 CUC 12,48 CUP
Energía	Mezclado	11,76 kW-h	5,00 CUC/kW·h	0,17	58,8CUC
	Tamizado	2,5 kW-h			12,5 CUC
Sub total		-	-	-	296,25CUC 14,91CUP
Mano obra	10-20 % Costo producción		-	-	44,44 CUC 1,88 CUP
Mantenimiento y reparación	2-10 % Costo producción		-	-	29,63 CUC 1,25 CUP
Total		-	-	-	370,32 CUC 18,05 CUP

Con una tonelada de mezcla preparada se pueden obtener 5882 limas (117,65 kg de agua, 294,11 kg de cemento y 588,24 kg de Abrasivo), considerando que la lima pesa 170 g.

El costo de fabricación unitario de una lima cerámica es de 0,088 CUC y 0,0043 CUP. Una lima de afilado de útiles de labranza, como la piedra de afilar guadaña, cuesta en el mercado internacional de 1,20 a 1,40 € [5]. Existen otras herramientas de este tipo, que pueden costar más, como las que se enuncian en el Epígrafe 1.4. Considerando 4224 limas elaboradas al año, como se estima en el segundo párrafo del presente epígrafe, si se multiplica por su costo en el mercado internacional (1,40 €; 1,75 CUC) entonces el resultado es 7392 CUC. La diferencia es 7021,68 CUC. Esto demuestra la rentabilidad económica de la producción industrial de las limas abrasivas con aglutinadas con cemento.

Como puede observarse, aproximadamente el 56,97 % del costo total de producción (370,32 CUC) lo representa el abrasivo, mientras que el cemento 26,55 %. El 16,48 por ciento restante se encuentra distribuido entre la mano de obra, la transportación y el consumo energético procedentes de la elaboración de las limas de cerámicas.

### **3.4. Valoración medioambiental**

La producción  $Al_2O_3$  mediante el proceso aluminotérmico, a través de la producción de desechos industriales, como la cascarilla de laminación y la viruta de aluminio, es el proceso que en su propia esencia considera los conceptos de tecnología limpia.

Esto puede afirmarse porque, tanto la viruta de aluminio, como la cascarilla de laminación son residuos de la producción de perfiles de aluminio y de laminado de acero, respectivamente, y por otra el proceso de reducción se realiza a expensas de la energía de la reacción química y, por tanto, no requiere de otro tipo de aporte energético.

A su vez la escoria resultante del proceso es un material de excelentes propiedades abrasivas de alta demanda industrial.

La fabricación de limas de cerámicas presentadas en el trabajo, potencia la protección medioambiental, al eliminar las etapas de prensado y sinterizado, disminuyendo grandemente los consumos energéticos, respecto a las tecnologías convencionales.

Todos estos criterios sustentan las bondades de esta tecnología para el procesamiento de estos residuales y validan la factibilidad en las condiciones técnico económico existente actual en Cuba.

### 3.5. Conclusiones Parciales del Capítulo III

1. La ecuación de la regresión del modelo, que se ajustado a los datos con un 92,6299 % de confianza es:  $REDDR = 39,4211 - 56,3527 \cdot R1 - 8,7971 \cdot R2 - 0,71149 \cdot t + 11,2226 \cdot R1 \cdot R2 + 0,910228 \cdot R1 \cdot t + 0,0808924 \cdot R2 \cdot t$ .
2. El gráfico de Pareto muestra la influencia marcada de la variable independiente relación agua cemento, así como la influencia de la interacción con la de abrasivo cemento. Se aprecia que la variable independiente tiempo de curado no influye significativamente, al igual que sus interacciones.
3. El punto experimental y sus réplicas (FF, FA, FN,) refieren la mejor relación de desgaste entre el patrón (acero) y la probeta (Lima).
4. La ecuación del modelo ajustado, con un 95,0 % de nivel de confianza es:  $Ensayo\ de\ impacto = 0,68 + 3,75 \cdot R1 - 1,9 \cdot R1 + 0,198167 \cdot t + 4,45833 \cdot R1 \cdot R2 - 0,46 \cdot R1 \cdot t - 0,0104167 \cdot R2 \cdot t$ .
5. El gráfico de Pareto muestra una influencia marcada en el efecto de la variable independiente de relación Agua/cemento (R1) y el tiempo de fraguado (t), mientras que la relación Abrasivo/Cemento prácticamente es insignificante.
6. El punto experimental "P" (PF) y sus réplicas (PA, PN,) refieren la mejor relación de resistencia al impacto entre el patrón (acero) y la probeta (Lima).
7. De una tonelada de materias primas (117,65 kg de agua, 294,12 kg de cemento y 588,24 kg abrasivo) se pueden obtener, aproximadamente, 5882 limas cerámicas para el afilado de útiles de labranza.

## Conclusiones Generales

1. El estudio bibliográfico demuestra que la escoria, subproducto del proceso de reducción aluminotérmica de la pirolusita, que contiene 60 % de corindón y 35 % de galaxita, es adecuada para su uso como material abrasivo de herramientas destinadas al desbaste, aún cuando no se ha demostrado su efectividad en limas cerámicas.
2. La combinación de un diseño experimental de relaciones con un diseño factorial completo resulta adecuado para estudiar factores, tanto de mezclas, como de procesos, para la evaluación de la relación agua, cemento y abrasivo de la mezcla, que compone las limas, y el tiempo de fraguado, necesario para la aceleración del acabado de las limas.
3. El molde de madera desarmable permite una elaboración y desmoldeo adecuado de las limas en verde con una productividad adecuada a escala semindustrial (4224 limas/año), evitando pérdidas de agua durante la conformación de la mezcla.
4. El ensayo de abrasividad aplicado simula las condiciones de trabajo de la herramienta, controla la regularidad del movimiento alternativo para cada lima evaluada y permite evaluar diferencias entre limas abrasivas elaboradas, a partir de mezclas de abrasivo cemento y agua, garantizando la reproducibilidad y la repetitividad experimental necesaria.
5. El modelo empleado para explicar la influencia de las relaciones de agua/cemento y de abrasivo/cemento, junto con el tiempo de curado, explica en con más de un 94 % de confianza la relación de desgaste relativo entre el patrón y la lima, demostrándose la influencia marcada de la variable independiente “relación agua/cemento”, así como la influencia de la interacción con la de “abrasivo/cemento” y que el punto experimental “F” refiere la mejor relación de desgaste entre el patrón (acero) y la probeta (Lima).
6. La ecuación del modelo ajustado para ensayo de impacto se explica con un 95,0 % de nivel de confianza, mostrándose una influencia marcada en el efecto de la variable independiente de relación agua/cemento ( $R_1$ ) y el tiempo de fraguado ( $t$ ), mientras que la relación abrasivo/cemento ( $R_2$ ) prácticamente es insignificante, determinándose que el punto experimental “P” refiere la mejor relación de resistencia al impacto entre el patrón (acero) y la probeta (Lima).

7. La lima que mejores condiciones ofrece para el trabajo de desbaste de herramientas de labranza, en el rango de composiciones estudiadas, está compuesta por 58,82 % de abrasivo, 29,41 % de cemento y 11,77 % de agua.
8. El costo de fabricación unitario de las limas 0,088 CUC y 0,0043 CUP. Una muela abrasiva en el mercado internacional cuesta 1,75 CUC. La ganancia de la producción de una tonelada de limas de cerámicas, a partir de escoria y cemento Pórtland P-350, es de 7021,68 CUC.

## **Recomendaciones**

1. Se recomienda construir los moldes de otro material más ligero, duradero e impermeable, tal como los plásticos o sintéticos.
2. Se recomienda valorar el efecto de la inclusión de distintos tipos y dimensiones de fibras en la composición de las limas sobre el potencial incremento de la resistencia al impacto de las limas.

## Referencias Bibliográficas

1. García Padrón, Y., *Obtención de materiales abrasivos a partir del procesamiento aluminotérmico de residuales industriales*. 2006, Universidad Central de Marta Abreu de las Villas: Santa Clara.
2. Palacios Arteaga, O., *METODOLOGIA PARA LA ELABORACION DE MUELAS ABRASIVAS SOBRE VASTAGO, A PARTIR DE ESCORIAS ALUMINOTERMICAS Y CEMENTO PÓRTLAND P-350*. 2007, Universidad Central Marta Abreu de las Villas: Santa Clara. p. 57.
3. Rodríguez Esquivel, J., *Obtención de materiales abrasivos a partir del procesamiento aluminotérmico de residuales industriales.*, in *Centro de Investigacion de Soldadura (CIS)*. 2004, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas: Santa Clara.
4. Malishev, A.N., G; Shuvalov, YU, *TECNOLOGÍA DE LOS METALES*. Pueblo y Educación ed. 1989, La Habana. 431.
5. ABRATOOLS.s.a. *Piedras de afilar guadañas*. [cited 2008 Jueves 4 de septiembre]; Available from: [http://www.abratools.com/cat2007/paginas\\_html/058.html](http://www.abratools.com/cat2007/paginas_html/058.html).
6. NORTON. *Piedras de Esmeriles*. [cited 2009 Sabado 7 de marzo]; Available from: <http://www.christensen.cl/uploads/biblioteca/pdfs/35c81a83c088052.pdf>.
7. Capris. *Piedras esmeril convencionales de corindon normal gris, forma 1 recta TYROLIT*. [cited 2009 Sabado 7 de marzo]; Available from: <http://www.capris.co.cr/pls/capris/NewCapris2.principal?niv1=0001&niv2=0023>.
8. ANONIMO. *PIEDRAS NUMEROS - PANES*. [cited 2008 Viernes 5 de septiembre]; Available from: [http://www.carbo-abrasivos.com.ar/Media/Documents/S00000000000000001079/piedras\\_afilar.pdf](http://www.carbo-abrasivos.com.ar/Media/Documents/S00000000000000001079/piedras_afilar.pdf).
9. Hesse, G. *Tipo de materiales de los abrasivos*. 2008 [cited 2008 2008/07/22]; Available from: <http://www.cielosur.com/gerardo2.php>.
10. ANONIMO. *Abrasivos Solidos*. [cited 2008 Jueves 4 de septiembre]; Available from: <http://www.cepillostriunfo.com.ar/Abrazivossolidoscentral.htm>.
11. ANONIMO. *JUEGO COMPLETO TAMIZ GRANOLOMETRIA ARIDOS*. [cited 2009 Lunes 16 de Febrero]; Available from: [http://www.habitamos.com/post/3665503/juego\\_completo\\_tamiz\\_granolometria\\_aridos](http://www.habitamos.com/post/3665503/juego_completo_tamiz_granolometria_aridos).
12. Tamices.cl. *TAMIZADORA DE ENSAYO (TYLER RO-TAP® II RX-94)*. [cited 2009 Lunes 16 de Febrero]; Available from: <http://www.tamices.cl/tamizadora-tyler-8rx94.htm>.
13. Ortelio Boada Carrazana, Y.S., *Teoría del Corte de Metales* Editorial Pueblo y Educación ed. Vol. Tomo II. 1985. 254.
14. Aneiro., F.M., G.D. Espinosa., and F.H. Sardiña., *TECNOLOGIA DE LOS METALES II*. Pueblo y Educación ed. 1985, La Habana.
15. Stones, A.G.W.H. *Muelas abrasivas y segmentos*. [cited 2008 Lunes 22 de septiembre]; Available from: [http://www.atlantic-bonn.de/uploads/media/Grinding\\_wheels\\_Spanish\\_04.pdf](http://www.atlantic-bonn.de/uploads/media/Grinding_wheels_Spanish_04.pdf).
16. TYROLIT. *Catalogo de Limas de media Caña*. [cited 2008 20 de Noviembre]; Available from: <http://fotos.infotarifa.com/baja/2189/FichAdj/Herramientas%20rectificadoras%20de%20uso%20manual%203.pdf>.
17. TARGET. *Limas de diamantes*. [cited 2008 Martes 30 de septiembre]; Available from: [http://www.industriasvila.es/Herramientas/PDF/limas\\_diamante.pdf](http://www.industriasvila.es/Herramientas/PDF/limas_diamante.pdf).
18. ABRATOOLS.s.a. *Bloques de pulido*. [cited 2008 jueves 4 de septiembre]; Available from: [http://www.abratools.com/cat2007/paginas\\_html/059.html](http://www.abratools.com/cat2007/paginas_html/059.html).
19. FORTEX. *BLOQUES DE PULIDO*. [cited 2009 Lunes 17 de Febrero]; Available from: [http://www.abramatic.com/f\\_abrasivos.html](http://www.abramatic.com/f_abrasivos.html).

20. ASFLEX. *Discos Abrasivos*. [cited 2009 Lunes 17 de Febrero]; Available from: <http://www.abraflex.es/ASFLEX08.pdf>.
21. ABRAFLEX(S.A). *DISCOS ABRASIVOS DE CORTE*. [cited 2009 Lunes 17 de Febrero]; Available from: <http://www.abraflex.es/Discos%20Abrasivos%20Asflex.htm>.
22. maya. *Discos de corte manual y desbaste para acero*. [cited 2009 Lunes 17 de Febrero]; Available from: <http://www.abramatic.com/mayra.htm>.
23. Wikipedia. *Limas(Herramientas)*. [cited 2008 Martes 23 de septiembre ]; Available from: [http://es.wikipedia.org/wiki/Lima\\_\(herramienta\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Lima_(herramienta)).
24. Barluenga Badiola, G. *Caracterización mecánica de los Materiales.(ensayos de resistencia)*. [cited 2009 Viernes 20 de Febrero]; Available from: [https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP\\_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-33157/TAB42351/Tema%206%20\(Ensayos%20mecanicos\)%20Materiales%20EUAT.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-33157/TAB42351/Tema%206%20(Ensayos%20mecanicos)%20Materiales%20EUAT.pdf).
25. ASTM.G133-95, *Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*. , W. Conshohocken, Editor: United States.
26. ANONIMO. *Dureza por Abrasión (Por Presión), Ensayo de abrasividad CERCHAR (CAI)*. [cited 2009 Lunes 19 de Enero]; Available from: [http://petro.uniovi.es/Docencia/lrc/Tema%2003%20Propiedades%20fisicas%20\(7\).pdf](http://petro.uniovi.es/Docencia/lrc/Tema%2003%20Propiedades%20fisicas%20(7).pdf).
27. INSTRUMENTS J. BOT, S.A. *Ensayo de abrasion en elastomeros(ABRASIMETRO)*. [cited 2009 Lunes 19 de Enero]; Available from: [http://www.jba.es/public\\_html/pdf/655.pdf](http://www.jba.es/public_html/pdf/655.pdf).
28. COSMOCAX. *Ensayos de desgaste*. [cited 2009 Martes 3 de marzo]; Available from: <http://cadcamcae.wordpress.com/2009/02/09/ensayos-de-desgaste/>.
29. Microtest. *Equipo para ensayos de abrasión* [cited 2009 Martes 3 de marzo]; Available from: <http://www.microtest-sa.com/lib/contenido.php?ID=abrasion>.
30. ASM.International, H.C., *Friction, Lubricacition, and Wear Techonology*. Vol. Volumen 18. 1992.
31. ASM.International, H.C., *Surface Engineering*. Vol. Volumen 5. 1994.
32. Torjan, R.F.y.P., *Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones*, ed. E.M.G. Hill. 1979.
33. Cemento Portland Especificaciones, in *NC 95-2001*. 2001: Cuba.
34. Rodríguez Esquivel, J., *Elaboración de muelas abrasivas a partir de residuales del proceso de reducción aluminotérmica*. , in *Facultad de Ingeniería Mecánica*. 2004., UCLV.
35. Perdomo, L., *Procedimientos de obtención simultanea de ferroaleaciones y escorias útiles para su empleo en la industria sideromecánica cubana*.
36. Perdomo, L., Gómez, C., *Desarrollo de materiales abrasivos y refractarios a partir de los productos obtenidos por procesamiento aluminotérmico de minerales cubanos y residuales industriales*, in *XV Forum de Ciencia y Técnica*. 2004: Santa Clara.
37. Gómez, C., *Muelas abrasivas de vástago, obtenidas a partir de materiales cubanos*, in *METÁNICA 2007*. 2007: La Habana.
38. Gómez, C., *Reducción del consumo energético en la obtención de muelas abrasivas sobre vástago*, in *MAS XXI*. 2007: UCLV.
39. Wikipedia. *Cemento Portland*. [cited 2008 Jueves 2 de septiembre]; Available from: [http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento\\_portland](http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento_portland).
40. Wikipedia. *Cemento*. [cited 2008 Jueves 2 de Septiembre]; Available from: <http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento>.
41. Andrade Garrido, M., *DISEÑO Y PROPIEDADES DE HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO ELABORADOS CON CEMENTO MEZCLA*. REVISTA DE LA CONSTRUCCIÓN, Diciembre 2004. **Volumen 3 - N° 2**: p. 42.
42. ANONIMO. *MONTEROS DE CEMENTO*. [cited 2008 jueves 17 de julio]; Available from: [http://www.carreteros.org/normativa/pg3/articulos/6/i/a\\_611.htm](http://www.carreteros.org/normativa/pg3/articulos/6/i/a_611.htm).

43. UNCETA-55848, *Catalogo - Lista de precios. Herramientas de Calidad (3)*. 1994, Elgoibar. p. 260.
44. ANONIMO. *REAL DECRETO 1039/1991, de 28 de Junio, por el que se aprueba la «Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado (EH-91)*. 1991 [cited 2008 Viernes 18 de julio]; Available from: <http://www.miliarium.com/Paginas/Leyes/Edificacion/RD1039-91.pdf>.
45. Palacios Arteaga, O., *METODOLOGIA PARA LA ELABORACION DE MUELAS ABRASIVAS SOBRE VASTAGO, A PARTIR DE ESCORIAS ALUMINOTERMICAS Y CEMENTO PÓRTLAND P-350*. Curso 2006 -2007, Universidad Central Marta Abreu de las Villas: Santa Clara. p. 57.
46. ANONIMO. *ENSAYO Y EMPLEO DE MATERIALES*. [cited 2008 5 de septiembre]; Available from: <http://www.fao.org/docrep/003/V9468S/v9468s07.htm>.
47. Instruments, Q. *La Densidad del Cemento*. [cited 2009 Lunes 18 de Mayo]; Available from: [http://www.quantachrome.com/\\_landing\\_pages/Google/Cement\\_density\\_spanish.htm?gclid=C O-RivbTj4gCFSOIFQodVCrLOA](http://www.quantachrome.com/_landing_pages/Google/Cement_density_spanish.htm?gclid=C O-RivbTj4gCFSOIFQodVCrLOA).
48. ANONIMO. *Cemento Portland*. [cited 2009 Lunes 18 de mayo]; Available from: [http://www.acaceres.addr.com/student\\_access/portland.pdf](http://www.acaceres.addr.com/student_access/portland.pdf).
49. ASTM\_A370-97a, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. 2001. p. 41.
50. Vergara Camacho, F.M.C., Norma Julieta. *APUNTES DE CIENCIA DE LOS MATERIALES II*. 2008 [cited 2009 Lunes 8 de Junio]; Available from: [http://azul.bnct.ipn.mx/Libros/ciencia\\_materialesII.pdf](http://azul.bnct.ipn.mx/Libros/ciencia_materialesII.pdf).

## ANEXO 1: Tablas

*Tabla 1. Designaciones convencionales de los números de granulosis y tamaños de granos de la fracción principal.*

Grupo	Números de granulosis	Dimensiones límites de granos de fracción principal, $\mu\text{m}$	Grupo	Números de granulosis	Dimensiones límites de granos de fracción principal, $\mu\text{m}$
Grano de rectificar	10	2500 – 2000	Polvos de rectificar	100	160 – 125
	12	2000 – 1600		120	125 – 100
	16	1600 – 1250		150	100 – 80
	20	1250 – 1000		180	80 – 63
	24	1000 – 800		230	63 – 50
	30	800 – 630		280	50 – 40
	36	630 – 500		320	40 – 28
	46	500 – 400	Micropolvos	–	40 – 28
	54	400 – 315		–	28 – 20
	60	315 – 250		–	20 – 14
	70	250 – 200		–	14 – 10
	80	200 – 160		–	10 – 7
	-	-		–	7 – 5
	-	-		–	5 – 3,5

*Tabla 2. Relación de la granulometría con la clase granulométrica de la muela abrasiva*

Número de grano vs tamaño			
Número de Grano	Tamaño (mm)	Número de Grano	Tamaño (mm)
8	2,830-2,000	100	0,150-0,110
10	2,380-1,680	120	0,153-0,090
12	2,000-1,410	150	0,090-0,060
14	1,680-1,190	180	0,090-0,050
16	1,410-1,000	220	0,075-0,045
20	1,190-0,840	240	0,047-0,043
24	0,840-0,600	280	0,038-0,035
30	0,710-0,500	320	0,031-0,028
36	0,600-0,420	400	0,018-0,016
46	0,420-0,300	500	0,014-0,012
54	0,350-0,250	600	0,010-0,008
60	0,300-0,210	800	0,008-0,006
70	0,250-0,180	1000	0,005-0,004
80	0,210-0,150	1200	0,004-0,003
90	0,180-0,130		

*Tabla 3: Normas cubanas encontradas en la Oficina Territorial de Normalización (OTN)*

NC 19-02-16	1983		(SUSTITUIDA POR NC 124 - 2 : 2001) SISTEMA DE NORMAS DE PROTECCION E HIGIENE DEL TRABAJO. HERRAMIENTAS ABRASIVAS. REQUISITOS GENERALES DE SEGURIDAD
NC 124-2	2001	71	SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO. SEGURIDAD DE LAS MAQUINAS. CONCEPTOS BASICOS. PRINCIPIOS GENERALES PARA EL DISEÑO. PARTE 2. PRINCIPIOS Y ESPECIFICACIONES TECNICAS. (ISO/TR 12100-2,1992,MOD) (OBLIGATORIA)
NC 188	2002	7	ARIDOS GRUESOS. ABRASION. METODO DE ENSAYO.
NC ISO 4649	2003	21	ELASTOMEROS, VULCANIZADO O TERMOPLASTICO. DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA ABRASION USANDO UN CILINDRO GIRATORIO CON LAMPARA ABRASIVA.(ISO 4649:2002,IDT)
NC ISO 10545-6	2003	8	BALDOSAS CERAMICAS. PARTE 6: DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA ABRASION PROFUNDA DE LAS BALDOSAS NO ESMALTADAS.(ISO 10545-6:2002, IDT)
NC ISO 10545-7	2003	12	BALDOSAS CERAMICAS. PARTE 7: DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA ABRASION SUPERFICIAL DE LAS BALDOSAS ESMALTADAS.(ISO 10545-7:1996, IDT)

Tabla 4: Datos obtenidos del ensayo desgaste

No.	Clasificación según		Peso de las limas (g)		Peso del patrón (g)		Tiempo (min,s,ms)
	Días de curado	El código tomado	Peso Inicial	Peso Final	Peso Inicial	Peso Final	
1	15	FF	157,7702	157,7026	20,8439	20,7780	15,00,42
2	15	LF	149,3025	148,8548	20,7780	20,7169	15,00,33
3	15	NF	156,6448	150,1403	20,7169	20,5423	14,59,43
4	15	PF	151,3096	149,2007	20,5414	20,4134	15,00,10
5	30	QF	158,7526	158,6108	19,6152	19,5722	15,00,06
6	30	SF	149,4481	149,2842	19,5722	19,5389	15,00,36
7	30	VF	158,4504	142,8472	19,5389	19,2803	15,00,22
8	30	ZF	150,4265	149,7425	19,2803	19,2176	15,00,07
9	15	FA	157,5221	157,4666	20,4134	20,3689	14,59,97
10	15	LA	144,9691	144,4517	20,3689	20,2925	14,59,94
11	15	NA	158,7774	149,7608	20,2925	20,1677	15,00,06
12	15	PA	153,4957	151,5563	20,1677	20,0477	14,59,84
13	30	QA	157,5957	157,4403	19,2176	19,1643	15,00,00
14	30	SA	147,8115	147,6174	19,1643	19,0955	14,59,97
15	30	VA	163,1341	148,4911	19,4759	19,3155	15,00,06
16	30	ZA	181,4792	181,3233	21,1712	21,1089	15,00,31
17	15	FN	158,3980	158,3184	20,0477	19,9913	15,00,25
18	15	LN	141,3751	140,8925	19,9913	19,9323	15,00,28
19	15	NN	161,3881	149,8595	19,9323	19,7586	15,00,25
20	15	PN	154,3059	152,0275	19,7586	19,6150	15,00,35
21	30	QN	159,5465	159,4184	21,1849	21,1490	14,59,97
22	30	SN	147,5001	147,3664	20,7540	20,7159	15,00,41
23	30	VN	160,9845	147,3017	21,1490	20,9603	15,00,06
24	30	ZN	155,0612	154,6412	21,1089	20,9733	14,59,91
Promedio del tiempo de trabajo del ensayo							15:00:23

Tabla 5: Resultados de cálculo de desgaste de la Probeta

Días de curado	No	Probeta	Desgaste por diferencia en peso(g)	Intensidad lineal del Desgaste (lg) (mg/km)	Desgaste Volumétrico (Wv) (g·cm <sup>-3</sup> )	Desgaste Gavimétrico (Wg)	Resistencia relativa al desgaste (Wr)	Velocidad o razón de desgaste (W')
		F	Probeta (Lima)					
15	F	FF	0,0676	255,9443	0,02626	9,94E-07	1,0257967	0,005
	L	LF	0,4477	1695,0629	0,18415	6,97E-06	7,3273322	0,030
	N	NF	6,5045	24627,0635	2,45757	9,30E-05	37,253723	0,434
	P	PF	2,1089	7984,6282	0,82867	3,14E-05	16,475781	0,141
30	Q	QF	0,1418	536,8772	0,05509	2,09E-06	3,2976744	0,009
	S	SF	0,1639	620,5513	0,06742	2,55E-06	4,9219219	0,011
	V	VF	15,6032	59076,1775	5,89530	2,23E-04	60,3372	1,040
	Z	ZF	0,6840	2589,7319	0,26877	1,02E-05	10,909091	0,046
		A						
15	F	FA	0,0555	210,1318	0,02156	8,16E-07	1,247191	0,004
	L	LA	0,5174	1958,9580	0,21282	8,06E-06	6,7722513	0,034
	N	NA	9,0166	34138,2705	3,40671	1,29E-04	72,248397	0,601
	P	PA	1,9394	7342,8745	0,76207	2,89E-05	16,161667	0,129
30	Q	QA	0,1554	588,3689	0,06037	2,29E-06	2,9155722	0,010
	S	SA	0,1941	734,8932	0,07984	3,02E-06	2,8212209	0,013
	V	VA	14,6430	55440,7088	5,53251	2,09E-04	91,290524	0,976
	Z	ZA	0,1559	590,2620	0,06126	2,32E-06	2,5024077	0,010
		N						
15	F	FN	0,0796	301,3782	0,03092	1,17E-06	1,4113	0,005
	L	LN	0,4826	1827,1998	0,19851	7,52E-06	8,1797	0,032
	N	NN	11,5286	43649,0989	4,35581	1,65E-04	66,3708	0,769
	P	PN	2,2784	8626,3819	0,89527	3,39E-05	15,8663	0,152
30	Q	QN	0,1281	485,0068	0,04976	1,88E-06	3,5682	0,009
	S	SN	0,1337	506,2093	0,05500	2,08E-06	3,5092	0,009
	V	VN	13,6828	51805,2400	5,16972	1,96E-04	72,5109	0,912
	Z	ZN	0,4200	1590,1863	0,16503	6,25E-06	3,0973	0,028

Tabla 6: Resultados de cálculo de desgaste del patrón

Días de curado	No.	Probeta	Desgaste por diferencia en peso(g)	Intensidad lineal del Desgaste (lg) (mg/Km)	Desgaste Volumétrico (Wv) (g·cm <sup>-3</sup> )	Desgaste Gavimétrico (Wg)	Resistencia relativa al desgaste (Wr)	Velocidad o razón de desgaste (W')
		<b>F</b>	<b>Patrón</b>					
15	F	FF	0,0659	249,5078	0,00838	3,17E-07	0,9749	0,004
	L	LF	0,0611	231,3342	0,00777	2,94E-07	0,1365	0,004
	N	NF	0,1746	661,0632	0,02221	8,41E-07	0,0268	0,012
	P	PF	0,1280	484,6282	0,01628	6,17E-07	0,0607	0,009
30	Q	QF	0,0430	162,8048	0,00547	2,07E-07	0,3032	0,003
	S	SF	0,0333	126,0791	0,00424	1,60E-07	0,2032	0,002
	V	VF	0,2586	979,1004	0,03290	1,25E-06	0,0166	0,017
	Z	ZF	0,0627	237,3921	0,00798	3,02E-07	0,0917	0,004
		A						
15	F	FA	0,0445	168,4840	0,0445	2,14E-07	0,8018	0,003
	L	LA	0,0764	289,2625	0,0764	3,68E-07	0,1477	0,005
	N	NA	0,1248	472,5125	0,1248	6,01E-07	0,0138	0,008
	P	PA	0,1200	454,3389	0,1200	5,78E-07	0,0619	0,008
30	Q	QA	0,0533	201,8022	0,0533	2,57E-07	0,3430	0,004
	S	SA	0,0688	260,4877	0,0688	3,31E-07	0,3545	0,005
	V	VA	0,1604	607,2997	0,1604	7,73E-07	0,0110	0,011
	Z	ZA	0,0623	235,8776	0,0623	3,00E-07	0,3996	0,004
		N						
15	F	FN	0,0445	168,4840	0,00566	2,14E-07	0,8018	0,003
	L	LN	0,0764	289,2625	0,00972	3,68E-07	0,1477	0,005
	N	NN	0,1248	472,5125	0,01588	6,01E-07	0,0138	0,008
	P	PN	0,1200	454,3389	0,01527	5,78E-07	0,0619	0,008
30	Q	QN	0,0533	201,8022	0,00678	2,57E-07	0,3430	0,004
	S	SN	0,0688	260,4877	0,00875	3,31E-07	0,3545	0,005
	V	VN	0,1604	607,2997	0,02041	7,73E-07	0,0110	0,011
	Z	ZN	0,0623	235,8776	0,00793	3,00E-07	0,3996	0,004

*Tabla 7: Efectos estimados e interacciones para la variable REDDR*

Promedio	= 1,65222	+/- 0,125231
A: Relación Agua Cemento	= - 0,889892	+/- 0,250463
B: Relación Abrasivo Cemento	= - 2,18519	+/- 0,250463
C: Tiempo de Curado	= - 0,448158	+/- 0,250463
AB:	= 1,79561	+/- 0,250463
AC:	= 1,36534	+/- 0,250463
BC:	= 0,970708	+/- 0,250463
Bloque	= 0,076358	+/- 0,354208
Bloque	= 0,155733	+/- 0,354208
Los errores estándar están basados en un error total con 15 g.l.		

*Tabla 8: Análisis de la Varianza para REDDR*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P- Valor
A: Relación Agua Cemento	4,75144	1	4,75144	12,62	0,0029
B: Relación Abrasivo Cemento	28,6504	1	28,6504	76,12	0,0000
C: Tiempo de curado	1,20508	1	1,20508	3,20	0,0938
AB	19,3453	1	19,3453	51,40	0,0000
AC	11,1849	1	11,1849	29,72	0,0001
BC	5,65365	1	5,65365	15,02	0,0015
Bloques	0,1679	2	0,08395	0,22	0,8027
Error Total	5,64585	15	0,37639		
Total (corr.)	76,6045	23			

*Tabla 9: Resultados de la Estimación para REDDR*

Fila	Observados Valor	Ajustados Valor	Inf. 95,0% CL para la Media	Sup. 95,0% CL para la Media
1	5,8927	5,36362	4,56286	6,1644
2	0,9807	1,31278	0,512008	2,11356
3	0,1151	0,412117	-0,388659	1,21289
4	0,4816	-,0475083	-0,848284	0,753267
5	2,4543	2,57942	1,77864	3,38019
6	1,5514	1,25926	0,458483	2,06003
7	0,0984	-0,430675	-1,23145	0,3701
8	0,7152	1,84038	1,03961	2,64116
9	6,1872	5,51785	4,71707	6,31863
10	1,0509	1,46701	0,666233	2,26778
11	0,1083	0,566342	-0,234434	1,36712
12	0,4709	0,106717	-0,694059	0,907492
13	2,2824	2,73364	1,93287	3,53442
14	1,7883	1,41348	0,612708	2,21426
15	0,0918	-0,27645	-1,07723	0,524325
16	1,5434	1,99461	1,19383	2,79538
17	5,5982	5,55754	4,75676	6,35831
18	1,0158	1,5067	0,70592	2,30747
19	0,122	0,606029	-0,194746	1,4068
20	0,4922	0,146404	-0,654371	0,94718
21	2,1106	2,77333	1,97255	3,5741
22	2,0253	1,45317	0,652395	2,25395
23	0,105	-0,236763	-1,03754	0,564013
24	2,3716	2,0343	1,23352	2,83507

Tabla 10: Medición hecha en el diseño de resistencia de impacto

Nº		Alto (a)				Largo (b)				Área cm <sup>2</sup>	Rx10 <sup>-2</sup> (kg·m)	Energía de impacto X10 <sup>-2</sup> (J·cm <sup>-2</sup> )
		1	2	3	P	1	2	3	P			
1	FF	10,50	11,20	10,70	1,08	10,40	10,30	10,20	1,03	1,11	1,85	1,67
2	LF	11,00	10,80	10,75	1,09	10,35	10,10	10,20	1,02	1,11	3,50	3,16
3	NF	10,20	10,60	10,70	1,05	10,95	10,80	10,85	1,09	1,14	2,15	1,89
4	PF	10,80	11,20	11,00	1,10	10,40	10,35	10,45	1,04	1,14	4,34	3,81
5	QF	10,25	10,15	10,20	1,02	10,80	10,90	10,85	1,09	1,11	2,50	2,24
6	SF	10,50	10,60	10,70	1,06	10,40	10,35	10,50	1,04	1,10	1,45	1,32
7	VF	10,65	10,60	10,85	1,07	10,60	10,25	10,70	1,05	1,12	1,00	0,89
8	ZF	11,00	10,80	11,50	1,11	10,25	10,40	10,50	1,04	1,15	2,80	2,44
9	FA	11,20	11,25	11,15	1,12	10,00	10,05	9,95	1,00	1,12	1,75	1,56
10	LA	10,90	11,00	10,80	1,09	10,00	9,90	10,05	1,00	1,09	3,50	3,20
11	NA	11,50	11,45	11,40	1,15	10,15	10,20	10,05	1,01	1,16	1,50	1,29
12	PA	11,70	11,45	11,40	1,15	9,95	9,90	10,00	1,00	1,15	5,00	4,36
13	QA	11,10	11,20	11,00	1,11	10,00	9,95	9,95	1,00	1,11	2,15	1,94
14	SA	11,20	11,30	11,40	1,13	9,90	9,85	9,95	0,99	1,12	1,50	1,34
15	VA	11,20	11,40	11,15	1,13	10,00	10,30	10,20	1,02	1,14	1,00	0,87
16	ZA	11,30	11,25	11,35	1,13	10,00	10,05	10,10	1,01	1,14	3,05	2,69
17	FN	11,30	11,20	11,15	1,12	10,10	10,05	10,10	1,01	1,13	2,00	1,77
18	LN	10,95	11,00	11,05	1,10	9,90	9,95	10,00	1,00	1,10	3,50	3,18
19	NN	11,00	11,20	11,10	1,11	10,20	10,05	10,20	1,02	1,13	1,80	1,59
20	PN	11,35	11,40	11,15	1,13	10,15	10,20	10,10	1,02	1,15	3,75	3,26
21	QN	11,10	11,20	11,30	1,12	10,05	10,00	9,95	1,00	1,12	1,80	1,60
22	SN	11,05	11,10	11,15	1,11	9,90	10,10	9,95	0,99	1,10	1,50	1,36
23	VN	11,00	11,20	11,70	1,13	10,00	9,95	10,00	1,00	1,13	1,00	0,88
24	ZN	11,30	11,25	11,35	1,13	10,20	10,00	10,15	1,01	1,14	2,50	2,19

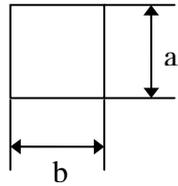


Tabla 11: Efectos estimados e interacciones para la variable Ensayo de Impacto ( $\times 10^{-2}$  J·cm<sup>-2</sup>)

Promedio	=2,10417	+/- 0,0692414
A: Relación Agua Cemento	=1,17667	+/- 0,138483
B: Relación Abrasivo Cemento	=0,151667	+/- 0,138483
C: Tiempo de Curado	=-0,915	+/- 0,138483
AB:	=0,713333	+/- 0,138483
AC:	=-0,69	+/- 0,138483
BC:	=-0,125	+/- 0,138483
Bloque	=0,104167	+/- 0,195844
Bloque	=-0,250833	+/- 0,195844
Los errores estándar están basados en un error total con 15 g.l.		

Tabla 12: Análisis de la Varianza para Ensayo de Impacto

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	F-Ratio	P- Valor
A: Relación Agua Cemento	8,30727	1	8,307277	72,20	0,0000
B: Relación Abrasivo Cemento	0,138017	1	0,138017	1,20	0,2907
C: Tiempo de curado	5,02335	1	5,05307	43,66	0,0000
AB	3,05307	1	3,05307	26,53	0,0001
AC	2,8566	1	2,8566	24,83	0,0002
BC	0,09375	1	0,09375	0,81	0,2810
Bloques	0,190558	1	0,0952792	0,83	0,4559
Error Total	1,72597	2	0,115065		
Total (corr.)	21,3886	23			

Tabla 13: Resultados de la Estimación para Ensayo de Impacto ( $\times 10^{-2} \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )

Fila	Observados Valor	Ajustados Valor	Inf. 95,0% CL para la Media	Sup. 95,0% CL para la Media
1	1,67	1,92	1,47725	2,36275
2	3,16	3,07333	2,63058	3,51609
3	1,89	1,48333	1,04058	1,92609
4	3,81	4,06333	3,62058	4,50609
5	2,24	1,82	1,37725	2,26275
6	1,32	1,59333	1,15058	2,03609
7	0,89	1,13333	0,690579	1,57609
8	2,44	2,33333	1,89058	2,77609
9	1,56	1,89875	1,456	2,3417
10	3,2	3,05208	2,60933	3,49484
11	1,29	1,46208	1,01933	1,90484
12	4,36	4,04208	3,59933	4,48484
13	1,94	1,79875	1,356	2,2415
14	1,34	1,57208	1,12933	2,01484
15	0,87	1,11208	0,669329	1,55484
16	2,69	2,31208	1,86933	2,75484
17	1,77	1,72125	1,2785	2,164
18	3,18	2,87458	2,43183	3,31734
19	1,59	1,28458	0,841829	1,72734
20	3,26	3,86458	3,42183	4,30734
21	1,6	1,62125	1,1785	2,064
22	1,36	1,39458	0,951829	1,83734
23	0,88	0,934583	0,491828	1,37734
24	2,19	2,13458	1,69183	2,57734

Tabla 14: Ruta ascendente para Ensayo de impacto.

Relación A Agua cemento	Relación A Abrasivo cemento	Tiempo de Curado (Días)	Pronosticado Ensayo de impacto
0,5	2,8	22,5	2,10417
1,5	7,92722	-37,2316	65,6427
2,5	13,8865	-94,189	241,724
3,5	19,9114	-150,617	530,561
4,5	25,9614	-206,831	932,166
5,5	32,0246	-262,928	1446,54

## ANEXO 2: Figuras



Figura 1: Tipo de Herramientas abrasivas



Figura 2: Formas de limas abrasivas

<b>PIEDRAS NUMEROS - PANES</b>					
<b>AFILADO MANUAL</b>					
 USO MANUAL	MEDIDAS (Ø,e,h) (mm)	CARACTERISTICA	CODIGO	CANTIDAD MINIMA Y MULTIPLOS DE	
	203,2 x 50,8 x 25,4	NRO.108	2.RV.5.00001060	50	
	152,4 x 50,8 x 25,4	NRO.109	2.RV.5.00001040	50	
	241,0 x 35,0 x 10,0	NRO.198-A	2.RV.5.00001030	20	

Fabricadas en Carburo de Silicio y Oxido de Aluminio, son indicadas para el afilado de cuchillos en el hogar, cuchillos industriales y herramientas de corte en general (guadañas, azadas, etc.).

Figura 3: Tipo de lima manual

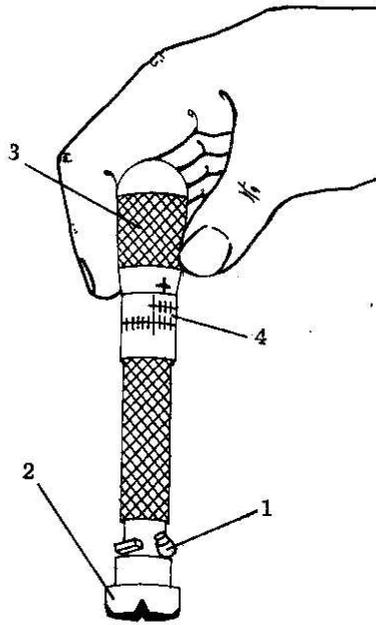


Figura 4. Durómetro de ensayo en seco

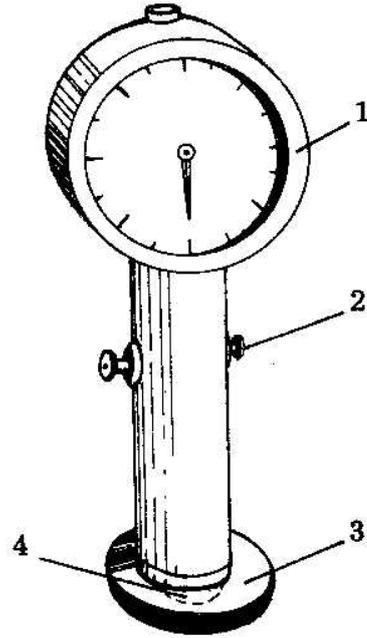


Figura 5. Durómetro de ensayo en verde

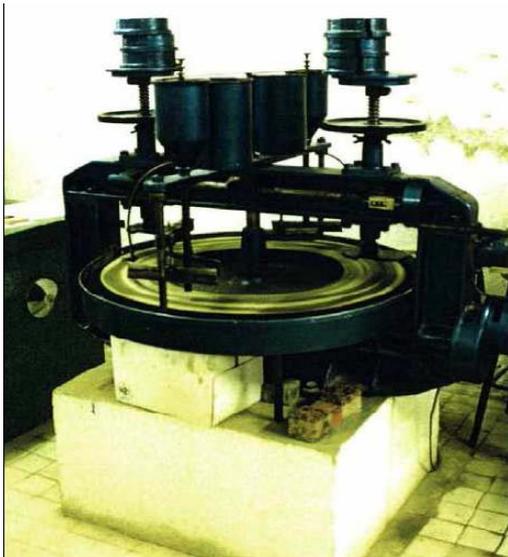


Figura 6: Pista de desgaste para pavimento

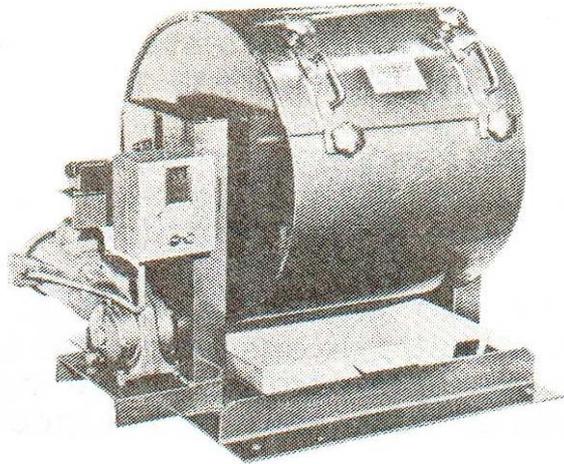


Figura: 7 Ensayo de Los Ángeles

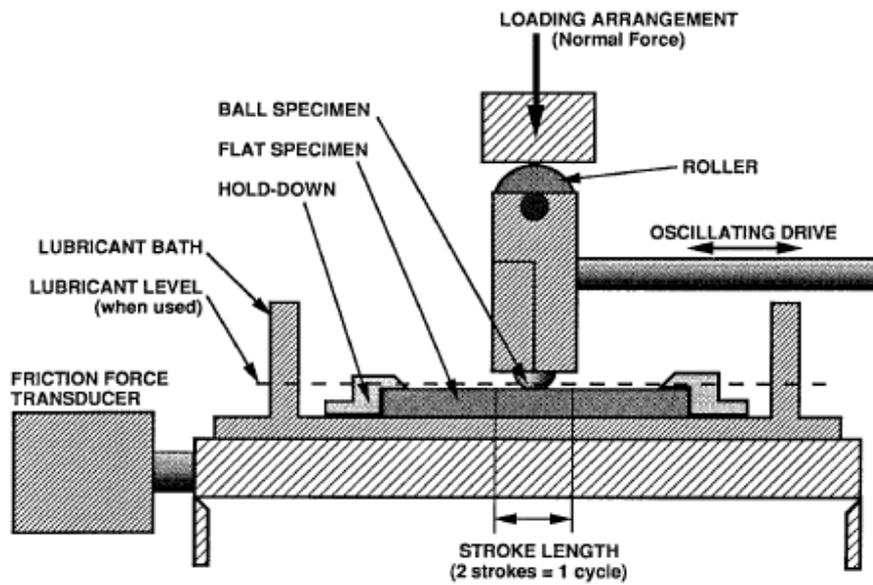


Figura 8: Ensayo recíprocante – Diagrama Cinemática [25]

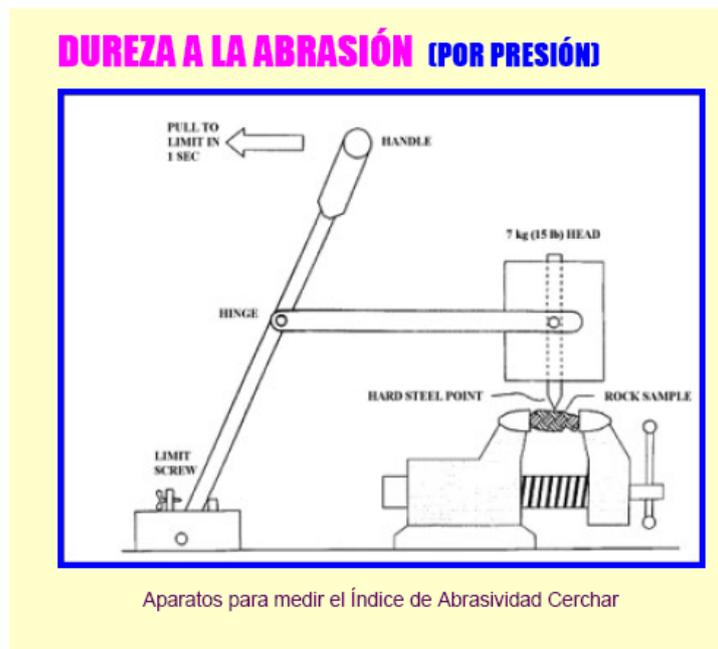


Figura 9: Ensayo de abrasividad CERCHAR



Figura 10: Ensayo de abrasión en ELASTOMEROS. Abrasímetro mod. 655.

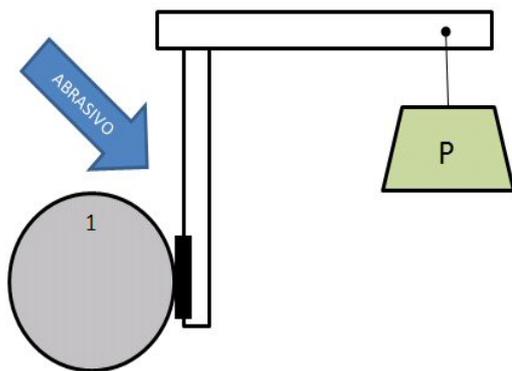


Figura 11. Ensayo de desgaste



Figura 12: Ensayos de abrasión



a)



b)

Figura 13: Molde empleado para la fabricación de las limas abrasivas  
a) Molde de madera armado  
b) Componentes del molde de madera



Figura 14: Dispositivo de abrasividad



*Figura 15: Equipamiento para el ensayo de abrasividad*



*Figura 16: Máquina para ensayo de abrasividad*



Figura 17: Máquina de ensayo Charpy

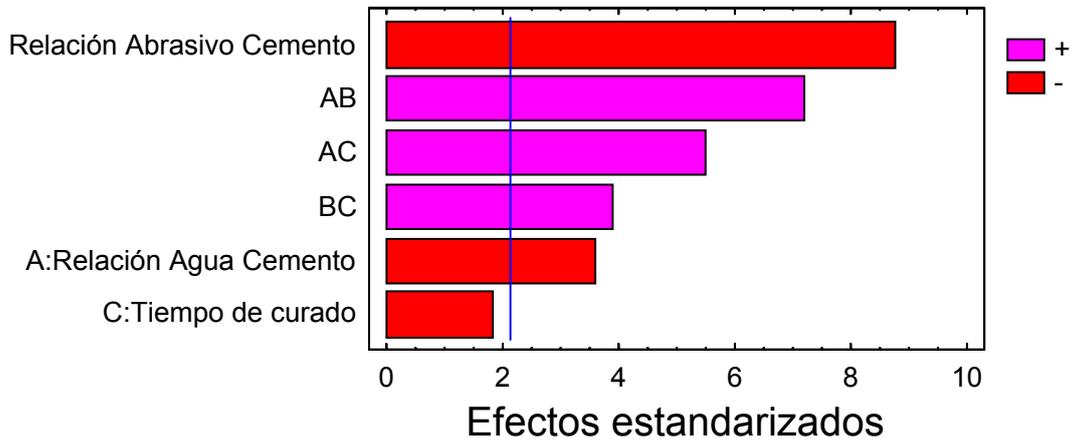


Figura 18: Gráfico de Pareto para REDDR

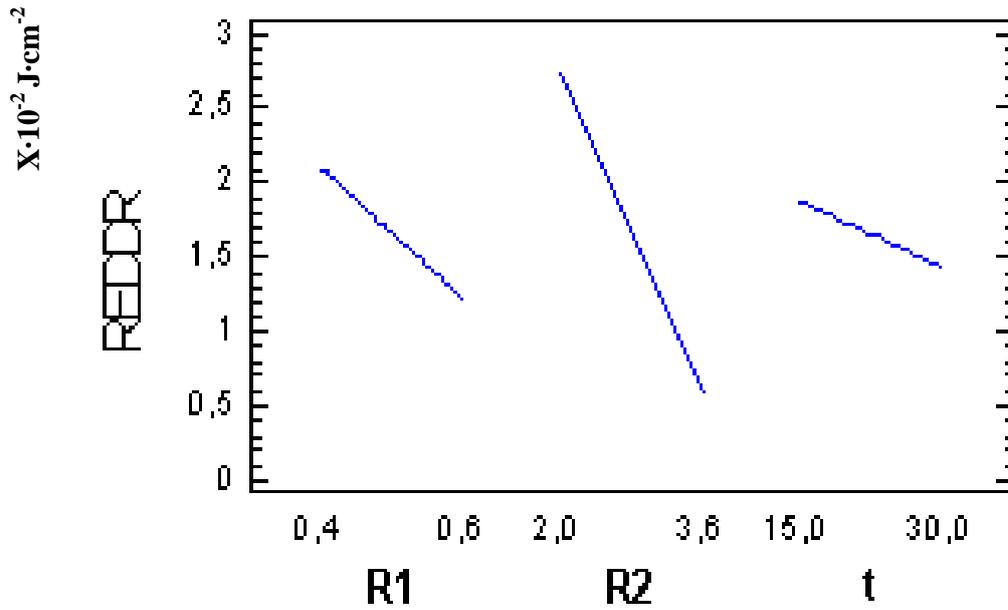


Figura 19: Gráfico de efectos principales para la variable dependiente Desgaste relativo

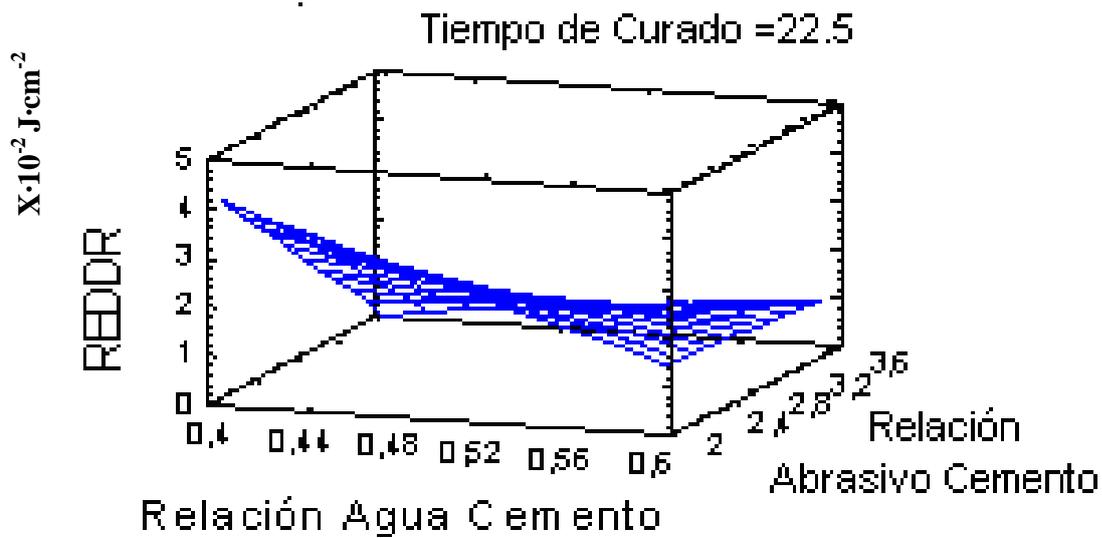


Figura20: Superficie respuesta estimada

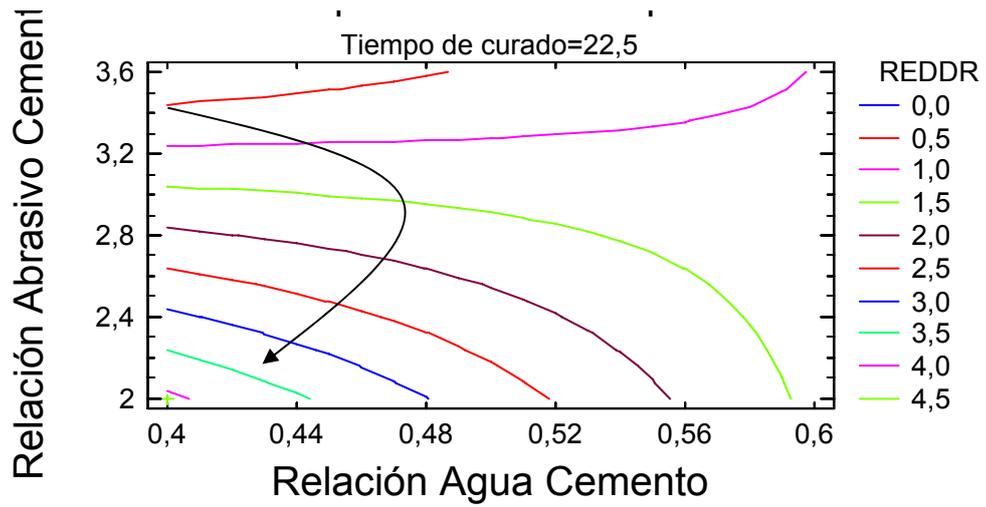


Figura 21: Contornos de superficie respuesta estimada para ensayo de desgaste

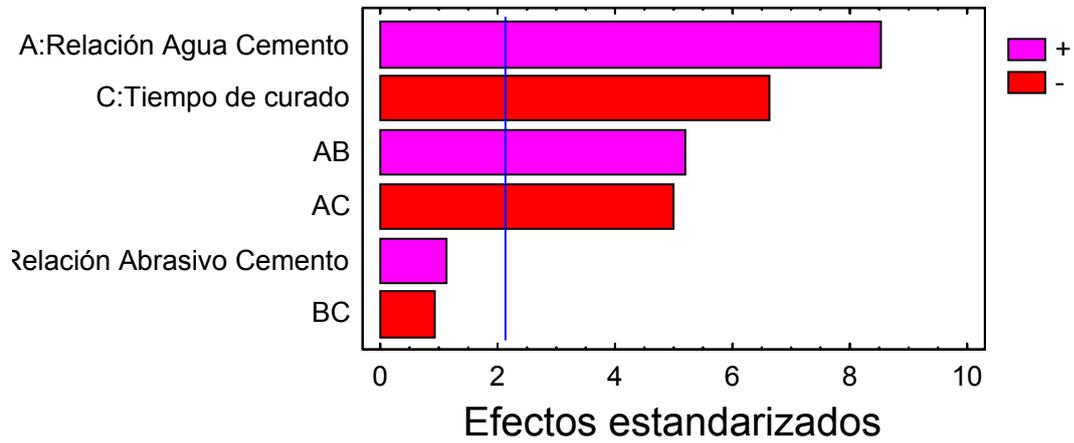


Figura 22: Gráfico de Pareto. Ensayo de impacto

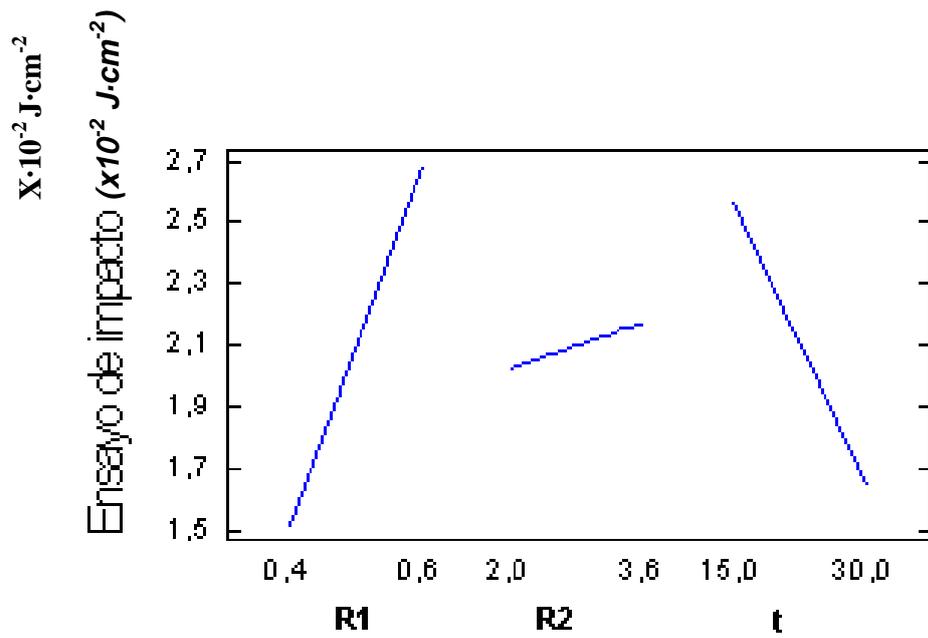


Figura 23: Gráfico de efectos principales para la variable dependiente del Ensayo de impacto

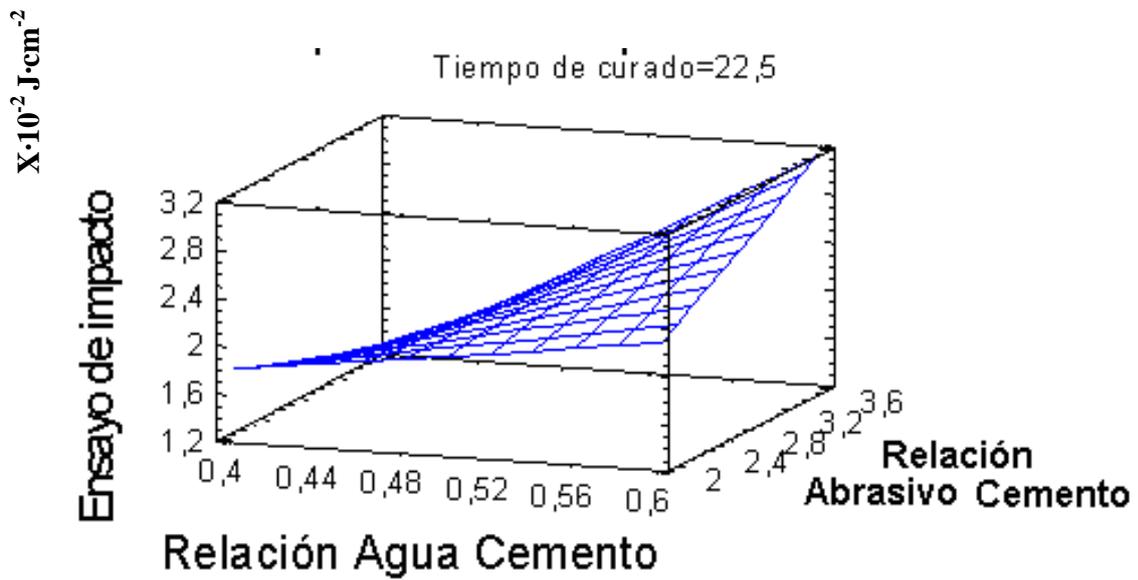


Figura 24: Superficie respuesta estimada

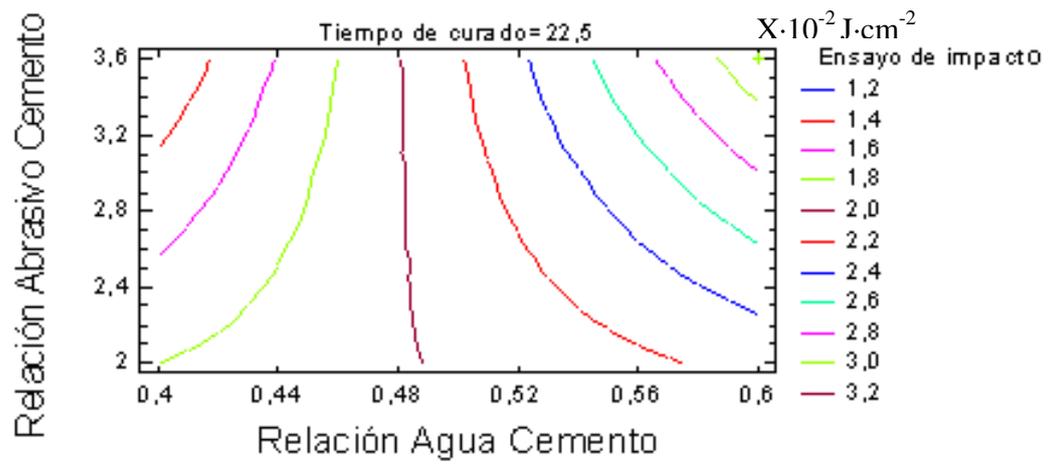
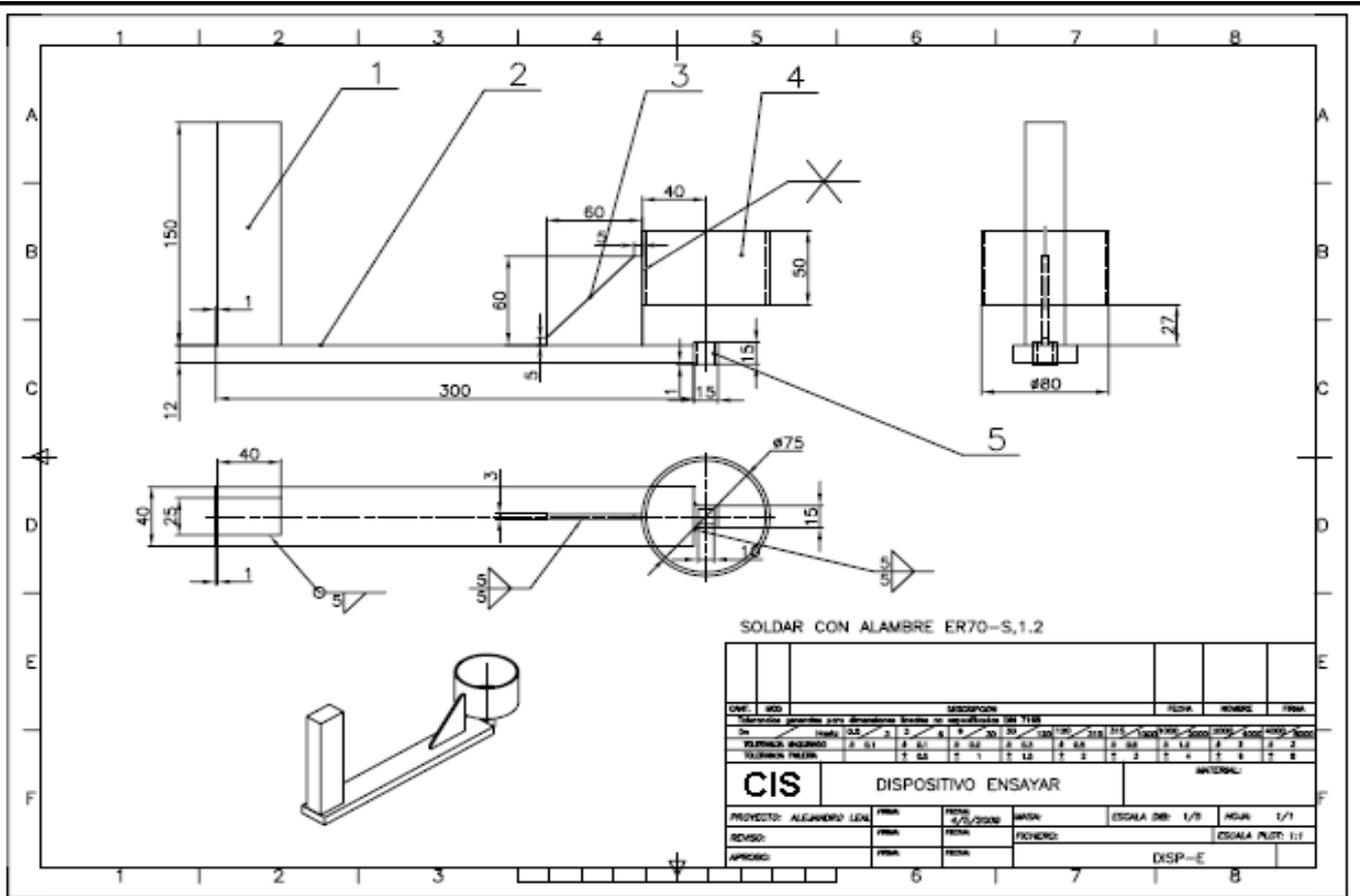


Figura 25: Contornos de superficie respuesta estimada

## ANEXO 3: Dibujo



Parts List											
FOR.	POS.	COD/NORMA	DENOMINACION	CANT.	MATERIAL	DIMENSIONES	M.n.u.	M.n.t.	M.b.u.	M.b.t.	OBSERVACION
	1		CUADRADO 1	1				0.000			
	2		CUADRADO 2	1				0.000			
	3		CARTABON	1				0.000			
	4		TUBO	1				0.000			
	5		TUBO CUADRADO	1				0.000			
							0.000	0.000	0.000	0.000	