



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

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE
SOLDADURA.

TRABAJO DE DIPLOMA

Obtención de materiales abrasivos a partir del procesamiento aluminotérmico de residuales industriales.

Autor: YOSBANY GARCÍA PADRÓN

Tutor: Dr. LORENZO PERDOMO GONZÁLEZ

Dr. AMADO CRUZ CRESPO

SANTA CLARA, 2006

"AÑO DE LA REVOLUCION ENER GÉTICA EN CUBA".

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA



RESUMEN

En el trabajo se realiza una revisión bibliográfica acerca de las características principales de los materiales abrasivos, los tipos, clasificación y sus aplicaciones, así como las formas tradicionales de obtención.

Se aborda un novedoso método de obtención de materiales abrasivos a partir del procesamiento aluminotérmico de residuales industriales, estudiándose la conformación de algunas mezclas compuestas por cascarillas de laminación y virutas de aluminio en las cuales se obtiene como producto principal una escoria de características abrasivas y como subproducto un metal que puede ser utilizado como materia prima en la industria siderúrgica.

Mediante la utilización de un diseño de experimentos del tipo Mc Lean Anderson se estudia la conformación de muelas abrasivas planas empleando como aglomerante cemento Pórtland las que pueden ser empleadas por el MICONS en el pulido de pisos.

ABSTRACT

In the work is carried out a bibliographical revision about the main characteristics of the abrasive materials, the types, classification and their applications, as well as the traditional forms of obtaining.

A novel method of obtaining of abrasive materials is approached starting from the aluminothermic prosecution of residual industrial, the conformation of some mixtures composed by lamination husks and aluminum chips in which it is obtained as main product a scum of characteristic being studied abrasive and I eat by-product a metal that can be used as matter it prevails in the steel industry. By means of the use of a design of experiments of the type Mc Lean Anderson the conformation of abrasive molars pages it is studied using as agglomerate I Portland cement those that can be employees for the MICONS in the refined of floors.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I Aspectos teóricos sobre los abrasivos	4
1.1- Características y campo de aplicación de los abrasivos.	
Clasificación.	4
1.1.1- Características de los abrasivos.	4
1.1.2- Campo de aplicación de los abrasivos.	6
1.1.3- Clasificación.	6
1.1.4- Granos y clasificación de polvos abrasivos.	7
1.2- Estructura y propiedades de las muelas abrasivas.	9
1.3- Tipos de materiales abrasivos.	11
1.3.1- Óxidos de Aluminio Convencionales (Al_2O_3)	11
1.3.2- Óxidos de Aluminio Zirconado	12
1.3.3- Óxidos de Aluminio Cerámicos	13
1.3.4- Carburo de Silicio (SiC)	13
1.4- Fabricación y control de calidad de herramientas abrasivas.	14
1.4.1- Aglutinantes.	15
1.4.2- Etapas del proceso de fabricación de muelas abrasivas.	17
1.5- Escorias aluminotérmicas.	18
1.5.1- Escorias aluminotérmicas del proceso de obtención de ferromanganeso.	19
1.5.2- Perspectivas de desarrollo de nuevos abrasivos a partir de minerales y residuales industriales.	20
CAPÍTULO II Parte experimental.	21
2.1- Desarrollo del material abrasivo.	21
2.1.1- Materias primas.	21
2.1.2- Preparación de las materias primas.	21
2.1.3- Equipamiento utilizado.	22
2.1.4- Secuencia de trabajo.	22
2.1.5- Procedimiento de trabajo	23
2.1.6- Procesamiento metalúrgico de las mezclas.	24

2.2-	Obtención de las muelas abrasivas.	26
2.2.1-	Diseño de experimento.	26
CAPÍTULO III Análisis de los resultados.		30
3.1-	Características del procesamiento aluminotérmico de metales.	30
3.2-	Materias primas. Potencialidades.	32
3.3-	Resultados del procesamiento metalúrgico.	33
3.4-	Evaluación de las escorias como material abrasivo.	36
3.4.1-	Resultados cualitativos del diseño de experimento.	36
3.4.2-	Procesamiento estadístico de los resultados.	37
3.5-	Evaluación económica y medio ambiental de la producción de abrasivos.	38
3.5.1-	Evaluación económica.	38
3.5.2-	Valoración medio ambiental.	39
3.6-	Evaluación industrial.	40
CONCLUSIONES.		41
RECOMENDACIONES.		42
BIBLIOGRAFÍA.		43
ANEXOS.		

INTRODUCCIÓN

En el Centro de Investigaciones de Soldadura se ha desarrollado un importante grupo de ferroaleaciones, empleando para ello métodos de reducción carbotérmicos. Estas ferroaleaciones han sido empleadas en el desarrollo de cargas aleantes de materiales para soldar y las escorias generadas de estos procesos se han utilizado en el desarrollo de matrices de fundentes para la soldadura automática por arco sumergido (SAW).

En la actualidad se ha estado trabajando en el método de reducción aluminotérmica, con el objetivo de obtener ferroaleaciones de muy bajo contenido de carbono, las que tienen grandes aplicaciones en la fabricación de acero y de electrodos de soldadura. Producto de este método se generan escorias de alto contenido de óxido de aluminio y alta dureza las cuales no encuentran aplicaciones en el desarrollo de consumibles de soldadura, debido a su alta temperatura de fusión (aproximadamente 1800⁰C) [1].

Buscando el fomento de tecnologías que no generen residuales sólidos y a partir de las características de las escorias aluminotérmicas se puede estudiar la posibilidad de aplicar estas escorias al desarrollo de materiales abrasivos de gran utilidad en la industria cubana [1].

La industria demanda una gran cantidad de materiales abrasivos, los cuales se emplean en múltiples formas, por ejemplo muelas abrasivas para la realización de operaciones de desbaste o acabado de piezas, se emplea una buena cantidad de materiales abrasivos en la construcción en el pulido de pisos. También se consume por parte de la industria un apreciable volumen de material abrasivo en forma de polvo (sand blasting) para realizar operaciones de limpieza y de acabado, así como en la fabricación de pastas abrasivas.

Todo esto permite estudiar la posibilidad de emplear las escorias generadas de los procesos aluminotérmicos en el desarrollo de materiales abrasivos.

Las grandes acerías encargadas de la producción de perfiles y chapas utilizan la laminación por ser el método más rápido y efectivo para la conformación de

metales [2], producto del calentamiento de estos materiales se generan capas de óxidos de hierro, estos óxidos de hierro son generalmente empleados para conformar termitas para soldar metales ferrosos. El más empleado por su composición constante, tamaño y otros metales presentes es el óxido generado en el calentamiento de lingotes de acero para su laminación, este óxido se produce en forma de laminillas finas, durante el calentamiento y al pasar el lingote por los rodillos de laminación, como estos rodillos se enfrían con agua la cascarilla resultante es una mezcla de óxidos e hidróxidos de hierro. Posteriormente la cascarilla se tamiza, lava y calcina para eliminar la humedad y transformar lo más posible el hierro que pueda contener a óxido férrico [2].

En Cuba no se obtienen termitas para soldar por lo que este residual ha tenido pocas aplicaciones, lo cual motiva que se acumulen en las fábricas con los consecuentes perjuicios a la industria y al medio ambiente.

Por otra parte, en las empresas productoras de utensilios o perfiles de aluminio se generan apreciables volúmenes de virutas, las que generalmente se refunden pero a expensas de altas pérdidas de metal

Estos dos residuales pueden ser mezclados en proporciones adecuadas de forma tal que permitan la obtención de una aleación que pueda ser empleada como materia prima y una escoria de alto contenido de Al_2O_3 factible de ser utilizada en el desarrollo de materiales abrasivos.

De todo lo anteriormente expuesto se señalan como objetivos del trabajo los siguientes:

Objetivo General

Estudiar la posibilidad de obtención de materiales abrasivos en las condiciones de la industria cubana

Objetivos Específicos

1. Obtener materiales abrasivos a partir del procesamiento aluminotérmico de residuales industriales.
2. Emplear los productos abrasivos obtenidos en el desarrollo de muelas abrasivas para la industria de la construcción.

Viabilidad:

Es viable realizar la fabricación de materiales abrasivos en Cuba desde el punto de vista de las condiciones industriales. Por otra parte existe una demanda real no cubierta en el país. Para la producción de muchos de los materiales abrasivos existentes se cuenta con recursos minerales y residuales factibles de procesamiento.

Justificación del trabajo:

Se realiza el trabajo a partir de las necesidades existentes de materiales abrasivos en las empresas del país y de la existencia de minerales, e incluso residuales para los cuales aún no se ha encontrado la vía adecuada de procesamiento. La tecnología de procesamiento no concibe etapas de alto consumo energético.

Hipótesis:

Es posible la obtención de un material abrasivo a partir del procesamiento aluminotérmico de minerales y/o residuales industriales cubanos.

Capítulo I: Revisión bibliográfica sobre los abrasivos.

1.1- Características y campo de aplicación de los abrasivos. Clasificación.

1.1.1- Características de los abrasivos.

Los materiales abrasivos son aquellos materiales, productos químicos o naturales, cuya dureza es mayor que la del objeto a rayar; estos pueden ser en polvo, líquidos, mixtos, aglutinados con materiales de resinas sintéticas, aleaciones metálicas y/o montados en soportes flexibles, rígidos, oscilantes y/o giratorios, estos tienen diferentes, formas, perfiles y dimensiones [3].

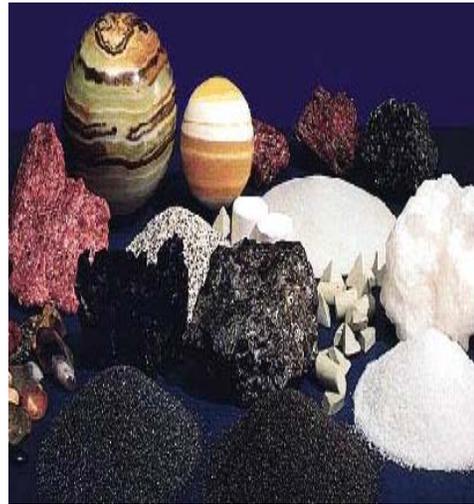


Fig.1.1 Ejemplos de abrasivos.

Estos tipos de materiales son de gran importancia industrial y presentan

composiciones y estructuras diversas, cuya característica común es la de ser utilizados para operaciones de pulido, corte o desgaste por fricción. Una muestra de los mismos se puede observar en la figura 1.1.

Los abrasivos se dividen en dos grandes grupos, los naturales y los artificiales abrasivos, los naturales son aquellos que se utilizan tal y como se encuentran en la corteza terrestre, con cierto grado de procesamiento, molienda, clasificación granulométrica, recubrimientos especiales o fijación sobre soportes adecuados. También están los abrasivos artificiales que se han desarrollado principalmente en las últimas décadas, los que han sustituido en parte a los naturales, abriendo nuevas posibilidades de aplicación, en especial los denominados súper abrasivos.

Entre las características fundamentales de los granos abrasivos se pueden señalar las siguientes [4]:

- A) Dureza: Puede ser definida como la resistencia a la acción del rayado. Basada en este concepto fue creada la conocida escala Mohs, donde el mineral más blando, el talco, es rayado por todos los otros y el más duro es el diamante, que no es rayado por ninguno y raya todos los otros. En cuanto a la dureza de una muela esta se define como la capacidad del aglutinante de mantener los granos en la muela bajo la acción de fuerzas exteriores.
- B) Tenacidad: es la capacidad que los granos abrasivos tienen de absorber energía, o sea, resistir a impactos bajo acción de los esfuerzos de choque sin perder el poder de corte. Por tanto, los granos, que poseen esta característica, son los indicados para las operaciones de elevadas presiones.
- C) Friabilidad: es la capacidad del grano de fracturarse durante la operación cuando este pierde el poder de corte, creando así, nuevas aristas de corte y obteniendo menor generación de calor. Por tanto los granos que presentan esta característica son los indicados en operaciones, que requieren la integridad física de la pieza a trabajar.

Probablemente la propiedad más importante es la Granulometría ya que mide el tamaño del grano. Este parámetro se mide mediante un número donde cuanto mayor sea la numeración, tanto menor será el tamaño del grano.

Existe la siguiente relación entre aplicación y granulometría:

Desbaste Pesado - Granos: 16, 24, 30, 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, 1200, 1500 y 2000

1.1.2- Campo de aplicación de los abrasivos.

Los materiales abrasivos tienen un amplio uso en la producción de diferentes herramientas utilizadas en la elaboración de metales y en operaciones de acabado de superficies no metálicas.

Las herramientas abrasivas se hacen de múltiples formas entre estas se tienen discos de varios perfiles y dimensiones, barras, placas, segmentos, así como en forma de polvos, granos esmeril de distintas dimensiones y calidades y lijas. Por medio de estas herramientas se pueden trabajar todos los materiales y metales, empezando desde los más blandos (aluminio) y terminando con los más duros.

Las herramientas abrasivas pueden ser producidas para realizar labores en objetos o piezas metálicas o no, por ejemplo en las no metálicas para allanar, alisar, pulir mármol, piedra, granito, cerámica, vidrio, madera, en las metálicas en la limpieza de piezas, limpieza de superficies, piezas fundidas, de acero y materiales varios, que precisen un acabado de sus superficies, entre otras aplicaciones en que se manifiestan con el desarrollo de la ciencia y la técnica.

1.1.3- Clasificación.

Para satisfacer las diferentes exigencias presentadas en la elaboración precisa de las piezas y otras aplicaciones, las herramientas abrasivas se fabrican de configuración, estructura y tamaños diferentes. En dependencia de sus configuraciones, las herramientas abrasivas se subdividen en cuatro grupos: muelas de rectificar, muelas de vástago, barretas esmeriladoras y segmentos.

En cuanto a la clasificación de las piedras o muelas abrasivas estas pueden clasificarse según la forma de empleo del abrasivo, formas geométricas, etcétera.

Según su forma de empleo y forma geométrica se pueden encontrar:

1. Polvos abrasivos.

2. Pastas abrasivas.
3. Papeles abrasivos.
4. Telas abrasivas.
5. Piedras de formas.
6. Circulares.
7. Segmentos abrasivos.
8. Barras abrasivas.
9. Muelas de vástago.

1.1.4- Granos y clasificación de polvos.

Los abrasivos manufacturados más comunes usan tamices o cedazos para medir los granos abrasivos. Ambos, los tamices y los tamaños de grano, se encuentran normalizados.

Estas medidas se refieren a los “macrogrits” ó simplemente granos “grits”.

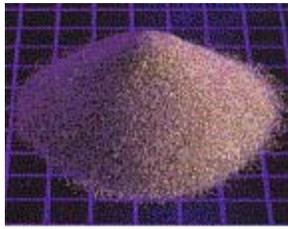
La firma KCA utiliza un proceso no estándar para la medición de los polvos abrasivos, que es la clasificación acuosa. El proceso es llamado “elutriation” y se puede definir como: “Decantado por medio de lavado”.

Luego que un material ha sido clasificado para una medida específica, hay varios métodos diferentes, que pueden ser usados para realizar el análisis del tamaño de partícula. Como consecuencia, el tamaño de partícula para una medida puede variar de una manufactura a otra.

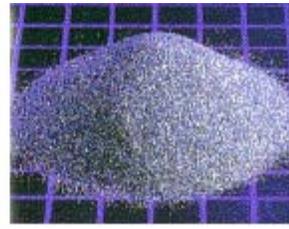
No obstante, la designación de medidas de tamices tal como #280, #320, etc.; puede ser utilizada para identificar polvos abrasivos.

Los términos “polvos” y “microgrits”, comúnmente se refieren para cualquier tamaño de partículas más finas que el # 240.

Cada medida de malla tiene un equivalente de designación de medida en micrones. Hay una regla muy importante: A medida que el número de medida en micrones (de la malla) es más bajo, la medida del material es más fino.



Corindón



Carburo de silicio

Fig. 1.2 Ejemplos de granos de Corindón y Carburo de silicio
(www.kabrasive.com)

En la tabla 1.1 se muestra una clasificación de los abrasivos atendiendo a su tamaño de grano [5].

Tabla 1.1 Clasificación de granos de abrasivos.

CLASIFICACION DE GRANOS PARA OXIDO DE ALUMINIO Y CARBURO DE SILICIO		
Grano / Tamiz Tamaño	Pulgada / milímetros (Promedio)	Micrones (Promedio)
12	0.063 / 1.600	1600
16	0.043 / 1.092	1092
20	0.037 / 0.939	940
24	0.027 / 0.685	686
30	0.022 / 0.558	559
36	0.019 / 0.482	483
46	0.014 / 0.355	356
54	0.012 / 0.304	305
60	0.010 / 0.254	254
70	0.008 / 0.203	203
80	0.0065 / 0.165	165
90	0.0057 / 0.144	145
100	0.0048 / 0.121	122
120	0.0040 / 0.101	102
150	0.0035 / 0.088	89
180	0.0030 / 0.076	76
220	0.0025 / 0.063	63
240	0.0020 / 0.050	50

Tabla 1.2 Propiedades típicas de polvos especiales y granos.

Detalle	Oxido de aluminio Fundido marrón	Oxido de aluminio Fundido blanco	Carburo de Silicio
Estructura Física	Macizo, sólido, angular	Macizo, sólido, angular	Macizo, sólido, angular
Color	Marrón	Blanco	Negruzco
Gravedad Específica	3,98	3,96	3,20
Formulación Química	Al ₂ O ₃ - 97% TiO ₂ - 2,75% SiO ₂ - 0,61% Fe ₂ O ₃ - 0,54%	Al ₂ O ₃ - 99,75% SiO ₂ - 0,02% Fe ₂ O ₃ - 0,04% Na ₂ O - 0,2%	SiC - 97,80% SiO ₂ - 1,26% Si - 0,49% Fe - 0,15% Al - 0,10% C - 0,20 %
Tamaños de grano y de polvos utilizados	8 -240 280 - 1200	8 - 240 280 - 1200	8 - 240 280 - 1200

1.2- Estructura y propiedades de las muelas abrasivas.

Los materiales usados en la fabricación de muelas abrasivas, se seleccionan dentro del grupo de los materiales abrasivos, según la aplicación en: los más resistentes, de mediana resistencia y blandos o menos resistentes, por ejemplo en metales para la limpieza de piezas, limpieza de superficies, piezas fundidas etcétera, para materiales no metálicos en acabado, pulido, desbaste de pisos, entre otros.

Para el empleo y fabricación de las muelas abrasivas es necesario que estas tengan determinada estructura y propiedades. Por estructura de una muela abrasiva podemos definir que es una relación cuantitativa entre las disposiciones relativas de los granos, el aglutinante y los poros; en la masa que constituye la muela, en la figura 1.2 se muestra como puede ser.

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 [6].

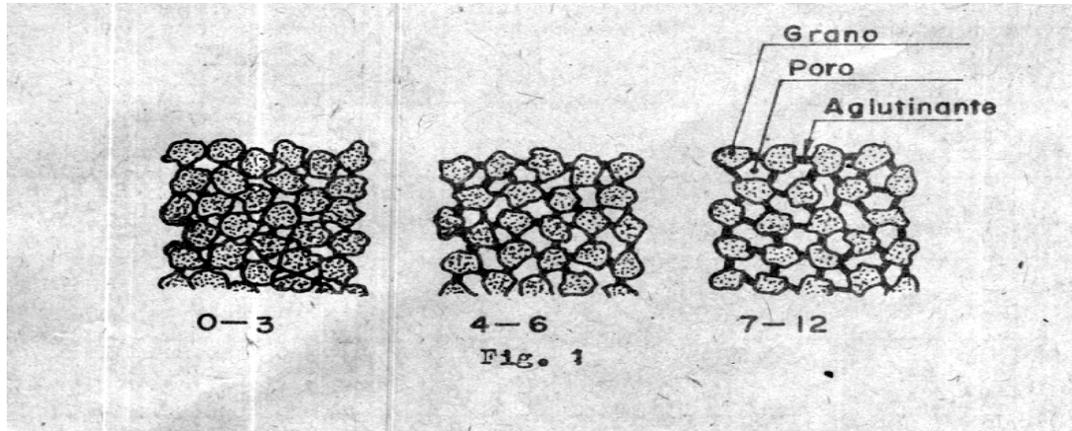


Figura 1.3 Disposición de los granos, poros y aglutinantes en la estructura de los materiales abrasivos.

La operación correcta de una muela abrasiva depende de la selección correcta de su estructura, por tanto para determinada aplicación la muela debe tener una adecuada estructura y determinadas propiedades.

Las muelas abrasivas cuenta con propiedades mecánico-físicas fundamentales como:

1. La dureza adecuada, ya que la dureza de la muela depende del material a trabajar. Si la muela es demasiado dura ésta se engrasa 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 tener granos en la superficie resistiendo la influencia de las fuerzas externas en la superficie.
2. El grano de abrasivo debe ser capaz de autoafilarse. La capacidad de autoafilado del grano no es más que el fácil desprendimiento de los granos para dar paso a otros de aristas más agudas.
3. Alta resistencia a la fuerza centrífuga.
4. Baja resistencia a la fractura y al agrietamiento.

1.3- Tipos de materiales abrasivos.

Entre los materiales más empleados en la industria como abrasivos están el óxido de aluminio (corindón) en sus múltiples formas de presentación y el carburo de silicio [7].

1.3.1- Óxidos de Aluminio Convencionales (Al_2O_3).

La obtención clásica del óxido de aluminio abrasivo consiste en la fusión de la bauxita, triturada y calcinada y mezclada con un pequeño porcentaje de carbón, hierro, además de Ti y MgO. La fusión ocurre a una temperatura de 1900°C a 2000°C en un horno por arco eléctrico, durante 36 h, en cuanto que el enfriamiento puede ser de hasta una semana. El bloque formado es posteriormente fracturado y triturado.

Este grano es extremadamente robusto y su forma de cuña permite la penetración rápida en materiales duros sin fracturarse o desgastarse excesivamente. Es usado en materiales de alta resistencia a la tracción como acero y sus aleaciones, hierro fundido nodular y maleable y también para materiales no ferrosos.

- Óxido de Aluminio Marrón (A): Grano abrasivo robusto y poco friable. Es utilizado en operaciones de corte, desbaste y rectificación en aceros de bajo carbono, cuchillos, palancas, picos, etc. En aplicaciones con lijas también es indicado para materiales no ferrosos como madera dura y aluminio.
- Óxido de Aluminio Blanco (38A): Operaciones de precisión (terminado) y afilado de herramientas de acero rápido. En aplicaciones con lijas es indicado para trabajar en materiales no ferrosos como la madera y el cuero.
- Óxido de Aluminio 19A: Utilizado en operaciones específicas donde es necesario la robustez del grano "A" con la friabilidad del grano "38A".

- Óxido de Aluminio 25DR: Grano abrasivo friable, indicado para operaciones de afilado de herramientas, rectificadoras cilíndricas y planas y operaciones con puntas montadas.
- Óxido de Aluminio 55A: Utilizado en operaciones de precisión, proporciona acción de corte rápido y friable con excelente mantenimiento del perfil.

1.3.2- Óxidos de Aluminio Zirconados.

Son granos abrasivos de óxido de aluminio combinados con óxido de Zirconio, constituido de cristales obtenidos a partir de la fusión de Arena Zirconada y Alúmina a las temperaturas de 1.900°C, seguida de enfriamiento. Estos granos poseen arista superafiladas que se renuevan durante el proceso, cortando por mucho más tiempo con menos calor, siendo ideal, por tanto, para aplicaciones de corte rápido y desbaste pesado.

- Grano Óxido de Aluminio Zirconado NZ: Rendimiento 2 a 3 veces superior a los granos convencionales. Indicado para desbaste pesado y corte rápido de metales ferrosos y en los casos de lijas. También usado en materiales no ferrosos, como maderas blandas o duras, materiales aglomerados y vidrios.
- Grano Óxido de Aluminio Zirconado ZF: Presenta elevada resistencia y elevado desempeño. Siendo, por tanto, indicado para desbaste pesado y alta remoción de metales ferrosos en acería y fundición.
- Grano Óxido de Aluminio Zirconado ZS: Presenta alta resistencia. Indicado para operaciones de acondicionamiento de barras, placas, etc., en el que las presiones de trabajo son extremadamente elevadas.

Los óxidos de aluminio Zirconados se caracterizan:

- Extremamente duros con alto índice de remoción y fragmentación;
- Capacidad de formar nuevas aristas cortantes.

- Altas tasas de remoción en metales ferrosos y no ferrosos: Acero inoxidable y madera plana.

1.3.3- Óxidos de Aluminio Cerámicos.

Granos abrasivos con estructura cristalina submicrométrica, derivada de un exclusivo proceso de sinterización. Poseen dureza y resistencia superiores cuando son comparados a los óxidos de aluminio convencionales obtenidos por el proceso de fusión. Son indicados para la utilización en materiales de difícil rectificación, en que productividad, calidad y reducción de costos necesitan ser minimizadas. Son producidos por procesos químicos y cerámicos, que hacen al material denso, duro y robusto. El proceso de fabricación produce un grano de óxido de aluminio de excepcional pureza, que suministra un abrasivo afilado micro-cristalino, el cual produce resultados superiores.

- a) Óxido de Aluminio Cerámico (Seeded Gel): Estos granos poseen formato redondeado y extrema friabilidad. Son utilizados en rectificaciones de precisión, en herramental y terminado, en rectificaciones cilíndricas e internas donde lo más importante es la integridad metalúrgica de la pieza a trabajar.
- b) Óxido de Aluminio Cerámico (TARGA): Es un grano de forma alargada, proporcionando mayores tasas de remoción y menor generación de calor. Este es utilizado en operaciones de desbaste pesado, rectificación cilíndrica e interna, operaciones de acabado y de desbaste. Este grano es utilizado por NORTON con la siguiente especificación: Grano TG.

1.3.4- Carburo de Silicio (SiC).

El carburo de silicio es obtenido en un crisol de metal, haciendo pasar con ayuda de un electrodo de carbono, una corriente eléctrica, a través de una mezcla de arcilla y carbón en polvo, formando alrededor del electrodo los cristales de carburo de silicio. Ya la producción industrial ocurre en hornos eléctricos de

resistencia y la carga básica consiste en sílice (arcilla blanca) y carbón de petróleo en porcentaje de 60% a 40% respectivamente. La temperatura de producción oscila entre 1900°C a 2400°C. Los abrasivos de carburo de silicio son generalmente recomendados para materiales de baja resistencia a la tracción (materiales no ferrosos y no metálicos), tales como: hierro fundido gris, bronce, latón, aluminio, cerámica, mármol, granito, refractarios, plásticos, gomas, etc. [8].

Este grano es utilizado por NORTON con las siguientes especificaciones:

1. Carburo de Silicio Negro (37C): Utilizado en las diversas operaciones de corte, desbaste y rectificación, excepto en herramientas de metal duro (Widia).
2. Carburo de Silicio Verde (39C): Utilizado exclusivamente en afilado de herramientas de metal duro (Widia).

Tabla 1.3 Escala de Mohs para medición de dureza en materiales abrasivos.

ESCALA DE MOHS DE DUREZA DE LOS MINERALES		
Dureza	Mineral	Equivalente diario
10	Diamante	Diamante sintético
intermedio	Carburo de silicio	
9	Corindón	Rubí
8	Topacio	Papel abrasivo
7	Cuarzo	Cuchillo de acero
6	Feldespató	Cortaplumas
5	Apatita	Vidrio
4	Fluorita	Clavo de hierro
3	Calcita	Moneda de bronce
2	Yeso	Uña del dedo
1	Talco	Polvos de talco

1.4- Fabricación y control de calidad de herramientas abrasivas.

El proceso de fabricación de materiales abrasivos se encuentra poco difundido a nivel internacional, donde una buena parte de la información está protegida por

patentes, siendo la producción y comercialización de estos productos patrimonio casi exclusivo de los países desarrollados.

Cuba cuenta con una sola Fábrica de abrasivos, situada en La Ceiba, Ciudad de La Habana, la cual se denomina “Unidad Básica, Fábrica de Abrasivos, Juan Domínguez Días Empresa de Cerámica Roja y Refractarios “. En ella se fabrican muelas abrasivas cilíndricas empleadas fundamentalmente en la industria mecánica y muelas abrasivas rectangulares empleadas fundamentalmente en operaciones de desbaste y pulido de pisos. Los materiales abrasivos empleados en Cuba para la fabricación de muelas abrasivas son todos de importación.

Para la elaboración de las mezclas en la fabricación de las muelas abrasivas se utilizan tres productos fundamentales como materias primas. Estos son: dos aglutinantes, uno que sinteriza a alta temperatura y otro, que hace la función de endurecedor a baja temperatura, feldespatos y silicato de sodio, respectivamente [4].

1.4.1- Aglutinantes.

Los aglutinantes empleados en la fabricación de muelas abrasivas pueden ser de origen orgánico o de origen inorgánico, los cuales influyen de manera decisiva en las aplicaciones futuras de los materiales fabricados. Entre los aglutinantes orgánicos se encuentran una serie de resinas (por ejemplo baquelita, volcanita, glicólico, etc.) y entre los inorgánicos los más difundidos son los materiales cerámicos entre ellos se encuentran arcillas refractarias, talco, cuarzo, silicatos, feldespatos, caolines, o mezclas en diferentes proporciones de estos componentes [6].

En Cuba se emplean como aglutinantes el silicato de sodio ó vidrio líquido y el feldespatos. El primero de ellos endurece a bajas temperaturas y el segundo sinteriza a temperaturas elevadas.

Los aglutinantes se definen por un grupo de características como por ejemplo:

- Tipo de material abrasivo.
- Tamaño de grano.
- Dureza.
- Estructura (compactación).
- Forma.

Además deben garantizar un grupo de propiedades y características de gran importancia como productos para la fabricación de piedras abrasivas entre ellas están:

- a) Una alta capacidad cortante.
- b) Productividad del instrumento.
- c) El mantenimiento seguro y la utilización completa de los granos.
- d) Bajo coeficiente de fricción.
- e) Contribuir a la disminución de la rugosidad de la superficie elaborada.
- f) Tener las propiedades de eliminar la adhesión con el material elaborado.

En Cuba existen importantes reservas de feldespatos, de las cuales existen algunas plantas dedicadas a su producción y comercialización destacándose la Planta de Pico Tuerto en Sancti Spíritus, los cuales son usados por la industria cerámica cubana incluida la producción de muelas abrasivas.

Los feldespatos forman un grupo de 3 componentes, las cuales son:

- Feldespatos potásicos KAlSi_3O_8 .
- Albita $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$.
- Anortita $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.

En cuanto al silicato de sodio este componente también se produce en Cuba en Sagua la Grande, Villa Clara a partir de una reacción química a altas temperaturas y presión entre el SiO_2 y el Na_2CO_3 . La propiedad fundamental del silicato de sodio es su modulo, caracterizado por la relación entre el $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$. El silicato de sodio puede ser de tipo metalúrgico o de pegamento.

En la elaboración de muelas abrasivas se utiliza silicato de sodio tipo pegamento ya que la relación de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ es superior y por tanto aumenta su poder como aglutinante, en comparación con el de tipo metalúrgico.

1.4.2- Etapas del proceso de Fabricación de muelas abrasivas.

- Conformación de las mezclas.
- Mezclado
- Moldeado
- Secado.
- Sinterización
- Acabado
- Control de calidad

La conformación de la mezcla es la etapa en la cual se determinan las proporciones exactas de cada uno de los componentes de la muela, los cuales son pesados y adicionados a la mezcladora. Tradicionalmente primero se realiza el mezclado de los componentes secos (feldespato, abrasivo) y después se adiciona el silicato de sodio. El feldespato y el silicato de sodio pueden representar hasta un 20% de la mezcla total. La calidad del mezclado define la homogeneidad de la mezcla.

En la etapa de moldeado se obtiene la herramienta abrasiva, esta operación se realiza adicionando al molde la mezcla obtenida y sometiéndola a un prensado donde la presión de trabajo está en función de la dureza que se desee obtener.

El secado del material abrasivo se realiza dejando la herramienta conformada al aire durante varias horas de forma tal que se logre un determinado grado de endurecimiento a partir de la reacción química entre el silicato de sodio y el CO_2 atmosférico.

Posteriormente es sometido a un proceso de sinterización donde es preciso tener un control estricto del proceso de calentamiento siendo éste realizado de forma moderada y de acuerdo a una curva de calentamiento previamente

establecida. Primeramente se elimina la humedad a una temperatura de 120°C prosiguiéndose el calentamiento hasta lograr cerca de 1260°C. Si no se cumple rigurosamente esta etapa, los materiales que se sinterizan pueden agrietarse. Las herramientas no pueden ser extraídas del horno hasta que el mismo esté totalmente frío, tampoco pueden abrirse las puertas del mismo.

Posteriormente las muelas son sometidas a un proceso de acabado donde son montadas en dispositivos especiales que permite corregir los diámetros tanto interior como exterior mediante el empleo de herramientas especiales (diamante).

La calidad de una muela puede determinarse por medio de un verificador de la dureza o midiendo la frecuencia de sonido cuando la rueda se golpea. El método sónico (cuando la muela se golpea) es afectado por los factores como el tipo de abrasivo, la composición, la cantidad de aglutinante, densidad, y grado de sinterización, no obstante este método es un método excelente para la inspección de calidad, sobre todo cuando se dispone de un personal experimentado.

Las muelas antes de comercializarse deben también ser equilibradas o balanceadas y finalmente deben ser sometidas a una prueba de velocidad a una velocidad de trabajo de por lo menos 50% mayor que la velocidad a que opera normalmente.

1.5- Escorias aluminotérmicas

En Cuba no existen grandes posibilidades de obtención de materiales abrasivos dado esto por la no disponibilidad de los minerales requeridos y por lo complejas y costosas que resultan las tecnologías de fabricación.

Al abordar el estudio de los procesos aluminotérmicos para la obtención de aleaciones se aprecia que como producto derivado de éste proceso se obtienen escorias con altos contenidos de Al_2O_3 lo cual puede ser una fuente valiosa para la obtención de materiales abrasivos si se logran las condiciones de enfriamiento que permitan obtener altos grados de dureza en las mismas.

La reacción química que caracteriza este proceso es la siguiente:



1.5.1- Escorias aluminotérmicas del proceso de obtención de ferromanganeso.

En el Centro de Investigaciones de soldadura se ha desarrollado una tecnología que permite el procesamiento aluminotérmico de minerales de manganeso permitiendo la obtención de un ferromanganeso de bajo contenido de carbono el cual se ha empleado en la fabricación de acero. Como residual de este proceso se generan escorias con las siguientes características [1]:

Composición química: Al_2O_3 : 60 – 65%, MnO : 20-22% SiO_2 : 6-8%.

Densidad: 3.801gr/cm³

Dureza: 8- 8.5 Escala de Mohs

Tamaño de grano: Todo un rango en dependencia de las características de la molienda

El contenido de Al_2O_3 junto al MnO hacen que en ellas predominen como fases fundamentales el Corindón de dureza 9 y la galaxita de dureza 7.5 hacen que ellas tengan una dureza superior a 8 en la escala de Mohs.

Estas escorias han sido evaluadas en la fabricación de materiales abrasivos.

Estas escorias son comparables con abrasivos comerciales por ejemplo el Corindón natural – Mapcor el cual tiene las siguientes características:

- Abrasivo natural compuesto de óxido de Aluminio y, conteniendo impurezas de y óxido de Fe y anhídrido Silícico.
- Características químicas: Al_2O_3 : 65-70, TiO_2 : 3,5-4, SiO_2 : 6-7, Fe_2O_3 : 20,5, CaO : 0,83, MgO : 0,44, Otros: 2,52
- Dureza: 8 / 9 Mohs
- Peso específico: 3,7 a 4

Si se comparan las características de las escorias generadas en el proceso aluminotérmico de obtención de ferromanganeso con este producto comercial se

puede apreciar que sus características son muy parecidas solo se diferencian en que las escorias aluminotérmicas de manganeso forman espinelas con manganeso y en este caso la espinela se forma con el hierro.

1.5.2- Perspectivas de desarrollo de nuevos abrasivos a partir de minerales y residuales industriales.

Existen en Cuba otros minerales y residuales que pueden ser empleados en procesos aluminotérmicos para la obtención de aleaciones y abrasivos. Un ejemplo de residual que puede ser empleado para estos fines son las llamadas cascarillas de laminación o escamas de hierro que se producen durante los procesos de laminación de acero. Estos productos están formados por Fe_2O_3 : 20 – 30%, Fe_3O_4 : 40 – 60%, FeO : 15 – 20 y entre 2 – 5% de Fe.

El contenido de oxígeno presente en este residual permite el desarrollo del proceso aluminotérmico sin la necesidad de suministro de energía adicional, pero además las escorias que se generan de la reducción aluminotérmica de los óxidos de escorias se verifican con mucha más eficiencia que las reacciones con los óxidos de manganeso lo cual trae como consecuencia que las escorias generadas tengan mayores contenidos de Al_2O_3 y por tanto mejores propiedades abrasivas.

Capítulo II: Parte experimental

2.1- Desarrollo de material abrasivo

2.1.1- Materias primas

La selección de las materias primas se realizó partiendo del criterio de utilizar solamente residuales industriales. Como reductor se utilizaron virutas de aluminio procedentes del proceso de maquinado de las cafeteras de la EINPUD “1ro de Mayo” de Santa Clara, como portador de oxígeno se utilizaron cascarillas de laminación procedentes de la Empresa Antillana de Acero de Ciudad Habana y aire atmosférico. La composición química de las diferentes materias primas se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Composición química de las materias primas utilizadas.

Viruta de aluminio		Cascarilla de laminación	
Comp.	Cont. %	Comp.	Cont. %
Si	3.5-4.0	Fe ₂ O ₃	20 – 30
Fe	0.5-0.6	Fe ₃ O ₄	40 – 60
Mn	0.3-0.35	FeO	15 – 20
Cu	0.5-0.8	Fe	2 - 5
Mg	0.3-0.5	Fe (Prom.)	70.82
Zn	0.5-0.6	O ₂ (Prom.)	24.18
Al	Balance	Impurezas	5.00

2.1.2- Preparación de las materias primas.

La cascarilla procedente de la laminación fue sometida a un proceso de tamizado por un tamiz de 2 mm con el objetivo de uniformizar el tamaño de grano y eliminar algunos objetos extraños que puedan quedar en su interior durante su recogida y almacenamiento.

Las operaciones de maquinado de las cafeteras se realizan manteniendo una recirculación de líquido refrigerante sobre las cuchillas, lo cual trae como consecuencia que las virutas generadas se obtengan con un alto nivel de contaminación con este aceite.

Para su utilización las virutas primeramente se someten a un proceso de clasificación a través de un tamiz de 5 mm, posteriormente se realiza el proceso de lavado con agua caliente y vapor con lo cual se logra eliminar el aceite refrigerante que contiene. Una vez limpia se procede al secado a temperatura ambiente.

2.1.3- Equipamiento utilizado

- Reactor de grafito
- Mezclador rotatorio tipo tambor
- Estufa eléctrica
- Balanza técnica

2.1.4- Secuencia de trabajo

Pesaje: El pesaje de los diferentes componentes se realizó con una balanza técnica.

Mezclado: Esta operación se llevó a cabo en un mezclador rotatorio, realizándose la alimentación de los productos en orden ascendente de densidades, el mezclado se realiza durante 30 minutos, colocándose el equipo con una inclinación de 30° respecto a la horizontal.

Secado: Una vez mezclados los diferentes componentes, la mezcla es calentada, en una estufa, a una temperatura de 120°C durante 2 horas.

Procesamiento metalúrgico: El procesamiento aluminotérmico de los residuales para la obtención de las escorias abrasivas se desarrolló en un reactor de grafito, el cual tiene un volumen de 2.2 litros que permite fundir hasta 6 Kg. de mezcla por colada. La figura 2.1 muestra un esquema del reactor utilizado, donde se puede observar la operación de encendido.



Fig. 2.1 Esquema del reactor utilizado.

2.1.5- Procedimiento de trabajo.

La mezcla de residuales caliente es adicionada en el interior del reactor para su posterior encendido mediante un arco eléctrico que se establece entre el crisol de grafito y un electrodo también de grafito, los cuales están conectados a los polos de una fuente de corriente, para esta operación puede servir cualquier tipo fuente de corriente y no es importante tener control de los parámetros de corriente que entrega.

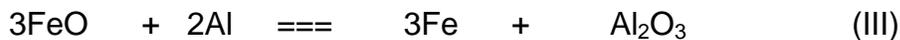
La alimentación al horno se realiza de forma continua en la medida en que va transcurriendo la reacción química. Una vez procesada toda la carga, se deja en reposo y una vez fría es extraída de forma manual, procediéndose a separar la aleación de la escoria.

En la búsqueda de mayores rendimientos de escorias se estudió la incorporación de oxígeno a la mezcla ardiente, lo cual debe favorecer la oxidación del aluminio, aumentando los rendimientos en cuanto a masa de escoria.

2.1.6- Procesamiento metalúrgico de las mezclas.

A partir de la composición química de la cascarilla y las virutas de aluminio se preparó una mezcla inicial en la cual se utilizaron cantidades estequiométricas de ambos componentes:

Para estos cálculos se utilizaron las siguientes reacciones químicas:



Las masas molares y atómicas de los diferentes óxidos y elementos químicos se dan a continuación: MM Fe_2O_3 = 160, MM Al_2O_3 = 102, MM Fe_3O_4 =232, FeO =72, MA Al= 27, y MA Fe= 56.

Tomando en cuenta la composición que se ofrece en la tabla 2.1 se considera que el residual está formado por 27% de Fe_2O_3 , 55% de Fe_3O_4 y 18% de FeO . A partir de estos datos se determina la cantidad estequiométrica de aluminio requerida para cada una de las reacciones químicas mostradas anteriormente, obteniéndose que para reducir todo el hierro presente se requieren de 30,68 gramos de aluminio por cada 100 gramos de residual.

El hierro obtenido puede ser utilizado en la industria como materia prima en la fabricación de acero y/o hierro fundido y las escorias generadas normalmente contienen más de un 95% de Al_2O_3 lo cual garantiza su aplicabilidad en el desarrollo de materiales abrasivos.

Esta mezcla inicial fue procesada de la manera señalada anteriormente, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla: 2.2 Conformación de las mezclas iniciales.

Mezcla	Masa aluminio estequiométrica (g)	Masa cascarilla (g)	Exceso de aluminio (g)
Inicial	307	1000	0
1	307	1000	300
2	307	1000	400

A partir de estos resultados se realizaron otros experimentos donde se varió la proporción cascarilla-aluminio. Además en las muestras donde se adicionó exceso de aluminio se insufló aire con el objetivo de favorecer su oxidación. Las mezclas fueron preparadas y procesadas según el procedimiento anteriormente señalado.

Cada una de las mezclas (calientes a una temperatura de 120⁰C) es llevada al reactor para proceder a su encendida, mediante arco eléctrico, lo cual activa la reacción química entre el óxido de hierro y el aluminio metálico. Como productos del proceso se obtiene una escoria (abrasivo) como producto principal y un hierro metálico como subproducto. En la tabla 2.3 se ofrecen los datos del procesamiento de las diferentes mezclas.

Tabla 2.3 Resultados del procesamiento de las mezclas.

Masa (g)	Mezcla				
	Inicial	1	1a	2	2a
Masa metal teórica	727	727	727	727	727
Masa metal real	664	672	683	712	698
Masa escoria teórica	579	1146	1146	1335	1335
Masa escoria real	576	618	927	675	1038
Masa que no reaccionó	13	74	21	97	32

a) colada realizada con alimentación de aire por la parte superior del reactor

La alimentación de aire al reactor se realiza por la parte superior del mismo, el aire proviene de un compresor que permite el suministro de un flujo constante de aire.

2.2- Obtención de las muelas abrasivas.

En el pulido de pisos se emplean muelas abrasivas planas con dimensiones de 5x5x6.6 cm. Una máquina de pulir requiere de tres de estas piezas para realizar su trabajo, cada una de estas muelas se colocan dentro de una estructura metálica (cepo) quien la sujeta y además evita que de romperse pueda provocar accidente ya que ellas normalmente reciben golpes (moderados) durante su funcionamiento. Este aspecto permitió estudiar la posibilidad de la conformación de dichas muelas sustituyendo el aglomerante clásico (silicato de sodio junto a otras sustancias inorgánicas) por cemento Pórtland evitando así la realización de la tan compleja y costosa operación de sinterización.

A partir de este criterio se decidió realizar un diseño de experimento donde se estudió la conformación de una mezcla utilizando como aglomerante el cemento Pórtland.

2.2.1- Diseño de experimento

Con el objetivo de seleccionar los puntos experimentales en una región restringida, los investigadores R. A. McLean y V. L. Anderson propusieron una metodología que se expone a continuación

En primer lugar, se buscan todas las posibles combinaciones para los niveles L y M en las $q - 1$ componentes. El número total de combinaciones es q^{q-1} , así para tres componentes el número total de combinaciones es 12 dejando siempre una componente libre para calcularla por el valor de la combinación de las restantes, q es el número de variables a ensayar.

En segundo lugar, se seleccionan las combinaciones encontradas cuya suma sea igual a la unidad y además que se encuentren dentro de las restricciones

impuestas inicialmente. De este modo se encuentran m puntos que son los vértices de un poliedro.

En tercer lugar a los puntos obtenidos anteriormente se le añaden los puntos de las caras del poliedro formado y el punto centro del mismo.

Las coordenadas de estos puntos definen las composiciones de las mezclas a ensayar. El diseño desarrollado por McLean y Anderson no es saturado por lo que se puede estimar los parámetros del modelo matemático y hacer la d'écima de adecuación F del mismo. Este modelo generalmente es un polinomio de segundo grado debido al rápido crecimiento de los puntos experimentales cuando se incrementan los componentes de la mezcla.

Para estudiar la composición adecuada de la mezcla se planteó un diseño de mezcla de tipo McLean Anderson donde se consideró las variables de entrada X_1 , X_2 y X_3 en sus correspondientes rangos, lográndose establecer diferentes combinaciones de las mezclas.

Se seleccionaron como variables de entrada o independientes las siguientes:

X_1 - Cemento Pórtland ($0.2 \leq X_1 \leq 0.5$)

X_2 - Arena sílice ($0 \leq X_2 \leq 0.5$)

X_3 - Abrasivo ($0.3 \leq X_3 \leq 0.8$)

Para la selección de las variables independientes se tomó en consideración que el cemento constituye el aglomerante, la arena se adiciona ya que es muy conocida la reacción de fraguado entre el cemento y la arena lo cual pudiera facilitar la obtención de mezclas de mayor resistencia con el cemento ya que no es conocida la factibilidad de ocurrencia de reacción entre el cemento y los granos de abrasivo.

El rango de variación de las diferentes variables se estableció a partir de criterios generales conocidos para la conformación de mezclas de concreto.

El número de experimentos a realizar se determina a partir de la siguiente expresión:

$N = q^{2^{q-1}}$ donde N es el número de experimentos y q el número de variables.

N = 12 experimentos.

La matriz experimental completa se muestra en la tabla 2.4.

Una vez sustituidos en la matriz los valores correspondientes a los niveles para cada variable independiente en la matriz experimental se aplica la condición de normalidad (la sumatoria de todos los componentes en la mezcla tiene que ser igual a la unidad) y se eliminan los puntos que no la cumplen, además son eliminadas las mezclas que se repiten y las que están fuera de los rangos experimentales previamente previstos.

Con todos estos elementos se confecciona la matriz experimental a desarrollar, obteniéndose que es necesario realizar 4 experimentos, a partir de los cuales se determina el centroide siendo el mismo realizado por triplicado con el objetivo de aumentar el número de experimentos y con ello reducir el error experimental. La matriz experimental a desarrollar se muestra en la tabla 2.5.

Tabla 2.4 Matriz experimental completa para estudiar la conformación de las muelas abrasivas planas.

No. exp.	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁	X ₂	X ₃	
1	M	M	?	0.5	0.5	0	NO
2	M	L	?	0.5	0	0.5	SI
3	L	M	?	0.2	0.5	0.3	SI
4	L	L	?	0.2	0	0.8	SI
5	?	M	M		0.5	0.8	NO
6	?	M	L	0.2	0.5	0.3	Se repite con 3
7	?	L	M	0.2	0	0.8	Se repite con 4
8	?	L	L	0.7	0	0.3	NO
9	M	?	M	0.5		0.8	NO
10	M	?	M	0.5	0.2	0.3	SI
11	L	?	M	0.2	0	0.8	Se repite con 4 y 7
12	L	?	L	0.2	0.5	0.3	Se repite con 3 y 6

donde: L = Nivel mínimo y M= Nivel máximo

Se seleccionan como variables dependientes o respuestas las siguientes:

Y_1 – Resistencia al rayado

Y_2 - Resistencia al impacto por caída libre (golpes)

Son seleccionadas estas dos variables como respuestas debido a que ambas propiedades influyen de manera significativa sobre el comportamiento de las muelas abrasivas durante su operación.

El experimento de resistencia al rayado se efectuó preparando un dispositivo en forma de martillo al cual se le colocó un clavo en su extremo y sobre él se colocó una masa de 3 kilogramos, este se desplazó sobre la superficie de la muela (fija). Posteriormente se comparó la huella que dejó en cada probeta y se confeccionó una escala relativa, todos en función de una muela patrón fabricada de la manera tradicional.

El ensayo de resistencia al impacto por caída libre (Y_2) se realizó dejando caer la muestra desde una altura de 2 metros, varias veces hasta lograr su rompimiento total, aquí se cuantificó el número de golpes requeridos para la rotura de la probeta. En la tabla 2.5 se muestra la conformación de las mezclas y los resultados obtenidos para las variables respuesta.

Tabla 2.5 Matriz del diseño experimental.

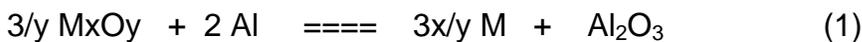
N _o de Exp.	Variables entrada			Variables respuesta	
	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
1	0.5	0	0.5	0.9	5
2	0.2	0.5	0.3	0.1	1
3	0.2	0	0.8	0.4	1
4	0.5	0.2	0.3	0.7	3
5	0.35	0.175	0.475	0.6	2
6	0.35	0.175	0.475	0.6	2
7	0.35	0.175	0.475	0.6	2

Capítulo III: Análisis de los resultados

3.1- Características del procesamiento aluminotérmico de metales.

El aluminio tiene una gran afinidad por el oxígeno, lo cual se puede ver a través de su alto calor de formación, este hecho permite que en una gran cantidad de casos puedan desarrollarse reacciones químicas sin la necesidad de suministrar energía adicional al proceso una vez que la reacción es iniciada. Este proceso ha sido denominado aluminotermia.

La ecuación química general que representa el proceso es la siguiente [9]:



donde M representa el metal que se obtiene

Esta reacción ha sido empleada en la práctica por su importancia en la obtención de metales puros y aleaciones metálicas, en la fabricación de corindón artificial y como fuente de calor en soldadura.

Los óxidos usuales son aquellos que tienen bajo calor de formación y los agentes reductores son los que cuando se oxidan tienen alto calor de formación. Los excesivos calores de formación de los productos, comparados con los materiales iniciales de la reacción representan el calor involucrado en la reacción, de aquí el nombre de exotérmico [10, 11].

La variación de energía libre de Gibbs (ΔG^0) para un proceso a presión constante puede representarse por la ecuación siguiente:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

donde:

ΔH^0 : variación de entalpía del proceso

ΔS^0 : entropía del sistema

T: temperatura

y la misma representa la ecuación de una línea recta de la forma $y = n + mx$ cuyos coeficientes n (ΔH^0) y m (ΔS^0) se encuentran reportados en la literatura. Según el diagrama de Ellingham [8,9] correspondiente a la formación de óxidos las rectas presentan en el origen un intercepto en las ordenadas, que corresponde a ΔH^0 y cuyas pendientes representan el valor de ΔS^0 . Este tipo de diagrama permite predecir la espontaneidad de una reacción de desplazamiento a una temperatura determinada. Al utilizar este diagrama o las tablas para el análisis de los valores de la energía libre de formación para los diversos óxidos se revela porqué se utiliza el aluminio en estas reacciones. Un valor grande y negativo de la energía libre de formación del óxido de aluminio hace que salvo raras excepciones no comunes en metalurgia, cualquier combinación con la energía libre de formación de otro óxido resulte en un ΔG^0 negativo, es decir, el proceso es espontáneo. Los metales que pueden ser desplazados de sus óxidos por el aluminio (ΔG^0) se dice que son menos activos que éste.

Tabla 3.1: Reacciones típicas de algunos procesos de reducción aluminotérmica.

Reacciones	Qp(cal/mol)	Temp. Alcanzada (°C)
$3/4\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{Al} \quad == \quad 9/4\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-198.9	3088
$3\text{FeO} + 2\text{Al} \quad == \quad 3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-205.2	2500
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \quad == \quad 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-200.6	2960
$3\text{CuO} + 2\text{Al} \quad == \quad 3\text{Cu} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-283.6	4866
$3\text{NiO} + 2\text{Al} \quad == \quad 3\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-224	3171
$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} \quad == \quad 2\text{Cr} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-130.3	2977
$3\text{MnO} + 2\text{Al} \quad == \quad 3\text{Mn} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-123	2427
$3\text{MnO}_2 + 4\text{Al} \quad == \quad 3\text{Mn} + 2\text{Al}_2\text{O}_3$	-212.2	4993

En todas las reacciones anteriores el aluminio ha sido usado como agente reductor, pero también el magnesio y el calcio son capaces de reducir gran número de óxidos metálicos [10].

Para comenzar la reacción una mezcla especial (mezcla iniciadora) de reactivos en polvo que incorpora peróxidos, cloratos o cromatos como agentes oxidantes y

polvo de aluminio como agente reductor, es requerida. Estos polvos de ignición pueden ser encendidos por una cinta de magnesio ardiendo, por la llama de un fósforo o por una chispa; ellos pueden a su vez arder con suficiente calor para alcanzar la temperatura de ignición (1482°C) de los polvos principales.

En la literatura [10, 12, 13] se hace referencia a que la reacción aluminotérmica tiene lugar en una vasija refractaria o crisol, destacándose como los materiales más usuales en la industria los de brea-magnesita, magnesita o alúmina lo más pura posible; así como especialmente las escorias de la reacción aluminotérmica, utilizando aglutinantes como el vidrio soluble.

La ventaja de este procedimiento, a pesar de ser caro por el empleo del Aluminio, estriba en que los metales resultantes quedan totalmente exentos de carbón, y es sabido que pequeñas cantidades de carbón en los metales o sus aleaciones les hacen perder sus mejores cualidades.

En cualquiera de los casos, el procesamiento aluminotérmico tiene como objetivo principal obtener un metal de alta calidad, siempre la escoria constituye el producto secundario y los óxidos metálicos utilizados como materias primas constituyen óxidos puros o concentrados de alta pureza.

No se ha encontrado en la literatura especializada reportes relacionados con el empleo de esta tecnología como vía de procesamiento de residuales donde el producto principal a obtener es una escoria.

Lograr esta simultaneidad de objetivos puede ser un aspecto muy positivo desde el punto de vista económico y como vía de reducir la generación de residuales sólidos.

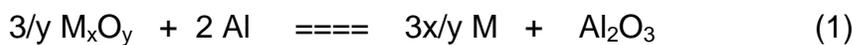
3.2- Materias primas. Potencialidades.

En la tabla 2.1 (Capítulo 2) se puede observar la composición química de las diferentes materias primas.

En ella se aprecia que las virutas están formadas por más de un 93% de aluminio, contenido capaz de garantizar el correcto desarrollo del proceso reductor, es habitual emplear en la industria, para estos fines, granallas con un

contenido mínimo de 90% de Al (Arangurent, 1963). En cuanto al resto de los elementos presentes en el aluminio el mayor por ciento está representado por el silicio el cual debe pasar fundamentalmente a la escoria debido a la alta afinidad que tiene este elemento por el oxígeno, de igual forma el magnesio debe pasar también a la escoria. El manganeso debe pasar una parte al metal y otra a la escoria y el hierro, cobre y cinc deben pasar fundamentalmente al metal. Las cantidades de cobre y cinc presentes en estas virutas no afectan la calidad del metal como materia prima para la elaboración de acero.

La reacción química general que representa el proceso de reducción que tiene lugar entre los óxidos metálicos y el aluminio es la siguiente:



donde: M representa el metal que se obtiene y M_xO_y son los óxidos metálicos presentes en la carga metalúrgica.

De la eficiencia con que se logren verificar estas reacciones depende la cantidad y calidad tanto del metal como de la escoria y constituye una vía para evaluar la eficiencia con que se desarrolla el proceso metalúrgico reductivo. A partir de la composición química de cada una de las materias primas y auxiliándose de las reacciones químicas se pueden determinar las potencialidades de las cargas metalúrgicas y se puede predeterminar la composición química teórica a obtener tanto en el metal como en la escoria.

Como se señaló en la introducción las cascarillas generada durante los procesos de laminación suelen tener una composición química bastante estable y tamaños de grano bastante estable a granulometrías por debajo de 1 mm, lo cual facilita las reacciones de reducción, debido a la gran superficie de contacto. En este caso no se propone realizar operaciones de lavado a las cascarillas ya que se pudo comprobar que los contenidos de óxido de hierro presentes en las mismas permitían un adecuado desarrollo de las reacciones de oxidación reducción y una eficiente separación del metal de la escoria.

3.3- Resultados del procesamiento metalúrgico.

En la tabla 2.2 se puede observar la conformación de las diferentes mezclas, en esta misma tabla se aprecia que la cantidad de aluminio fue incrementada con relación al valor estequiométrico, esto se realizó con el objetivo de aumentar la relación metal escoria debido a que el objetivo central del trabajo es la obtención de escorias.

En la tabla 2.3 se muestran los resultados obtenidos del procesamiento metalúrgico de cada una de las cargas.

La mezcla 1 fue preparada utilizando proporciones estequiométricas de los reactantes, lográndose una recuperación del hierro presente en las cascarillas de un 91% con relación al contenido teórico. Las escorias fueron recuperadas en un 99%. La tabla 3.2 muestra los rendimientos de metal y escoria alcanzados con cada una de las mezclas.

Tabla 3.2: Rendimientos de metal y escoria obtenidos para cada una de las mezclas.

Masa (g)	Mezcla				
	Inicial	1	1a	2	2a
Rendimiento metal	91.3	92.4	93.9	97.9	96.0
Rendimiento escoria	99.5	53.9	80.9	50.6	77.8

El encendido de las diferentes mezclas fue adecuado, no observándose grandes dificultades en el mantenimiento de la reacción. En el caso de las mezclas que se le adicionó aire la reacción fue más violenta. La separación del metal y la escoria también se realizó de manera eficiente.

En la tabla 2.3 y 3.2 se puede observar que la cantidad de hierro producida tiende a aumentar ligeramente, en la medida en que aumenta el exceso de aluminio, lo cual puede ser consecuencia de que parte del exceso de aluminio

presente en la mezcla pase a formar parte del metal. En este caso no se apreció influencia significativa del aire insuflado con relación a la masa de metal obtenida si comparamos las mezclas realizadas en condiciones ambientales normales, con las producidas suministrando aire al proceso.

En cuanto a las escorias producidas el mayor rendimiento de escoria se obtiene para la mezcla estequiométrica, esto está dado porque en este caso la reacción se produce sólo entre el oxígeno de la cascarilla y las virutas de aluminio. En el resto de los casos el exceso de aluminio debe reaccionar con el oxígeno contenido en el aire.

En la tabla 3.2 se puede apreciar que al comparar las mezclas con igual exceso de oxígeno pero procesadas de manera diferente se obtiene también resultados diferentes. En estos casos se puede observar la significativa influencia del aire en el aumento de la conversión del aluminio a óxido, donde en los dos casos estudiados con adición de aire los rendimientos de escoria aumentaron significativamente.

En la figura 3.1 se puede observar una foto de la instalación utilizada para el procesamiento aluminotérmico mediante suministro de aire.



Fig. 3.1 Instalación utilizada para el procesamiento aluminotérmico con suministro de aire.

Este aumento de los rendimientos puede ser muy importante ya que de lograrse condiciones adecuadas de suministro de aire y alimentación de productos pudieran obtenerse resultados muy significativos, sobre todo en lo relacionado con la pureza de las escorias ya que estas no contendrían los óxidos no reducidos presentes en la cascarilla, lo cual debe hacer que los contenidos de Al_2O_3 aumenten de manera significativa. Un aspecto importante a destacar es que las mezclas que fueron procesadas con alimentación de aire pudo observarse en la parte superior de la masa fundida una capa blanca de óxido de aluminio muy fino, lo cual permite corroborar que se produjo la reacción entre el aluminio y el oxígeno del aire.

Las escorias obtenidas de este proceso fueron empleadas en la elaboración de muelas abrasivas planas, las cuales serán empleadas en el pulido de pisos en la industria de la construcción, operación de gran importancia dentro del movimiento constructivo realizado en todo el país como parte de las obras priorizada dentro de la Batalla de Ideas.

Debe destacarse que en este caso el producto principal a obtener es la escoria (material abrasivo), el metal obtenido constituye el producto secundario el cual puede ser utilizado como materia prima en la elaboración de acero, de aquí la idea de favorecer la producción de mayores volúmenes de escoria, lo cual se favorece con la alimentación del aire al reactor.

3.4- Evaluación de las escorias como material abrasivo.

Al realizar una observación visual de las escorias se puede apreciar que ellas tienen un color grisáceo y una alta dureza, esto se comprobó mediante el rayado de un recipiente de vidrio, lo cual le brinda grandes posibilidades de empleo en el desarrollo de materiales abrasivos.

La posibilidad de fabricar muelas abrasivas planas mediante el empleo de cemento Pórtland puede resultar muy ventajosos desde el punto de vista económico ya que se elimina la operación de sinterización donde se requiere

temperaturas que oscilan entre 1250 – 1300⁰C, lo cual es extremadamente costoso y complejo.

Además la conformación de muelas con hormigón puede realizarse en las condiciones de cualquier empresa de la construcción, pudiéndosele sólo suministrar el material abrasivo y ellas encargarse de su producción, esto puede simplificar los esquemas tecnológicos de las plantas de producción de abrasivos y ampliar sus posibilidades de suministro de los abrasivos en forma de polvo.

En el diseño de experimento utilizado para conformar las diferentes mezclas se pudo observar en la tabla 2.5 que las mezclas que contenían las menores cantidades de cemento en su conformación fueron las de mejores resultados, lo cual permite afirmar que se produjo una adecuada reacción entre el cemento y el abrasivo, aún sin la presencia de la arena. Este aspecto simplifica la conformación de la muela ya que para ello solo se requiere de dos materiales.

3.4.1- Resultados cualitativos del diseño de experimento.

Al realizar una evaluación cualitativa de cada una de las probetas fabricadas se puede señalar lo siguiente:

La muestra 1 presenta una superficie lisa, dura y buen acabado superficial.

La muestra 2 presenta poros en la superficie, burbujas de aire y esta quebradiza.

La muestra 3 no presenta poros pero es muy frágil.

La muestra 4 presenta una superficie lisa, dura y buen acabado.

Las muestras 5, 6 y 7 tienen pocas grietas y su superficie generalmente es lisa.

Para la mezcla 1 se obtuvieron resultados casi similares a los obtenidos con una muela fabricada de la manera tradicional.

Los ensayos realizados a estas muelas permiten afirmar que ellas cumplen los requisitos básicos para su empleo en el pulido de pisos.

3.4.2- Procesamiento estadístico de los resultados.

En la tabla 2.5 se puede observar que los mejores resultados se obtienen para las mezclas 1 y 4 donde para la mezcla 1 se obtuvo que la resistencia al rayado de la probeta fue del 90% con relación a la muela patrón y resistió cuatro caídas desde una altura de dos metros sin romperse, única mezcla que alcanzó tales resultados.

Al procesar estadísticamente las dos variables dependientes mediante el Software Statgraphics se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

Para la variable respuesta Y_1 (resistencia al rayado) se obtuvo el siguiente modelo:

$$Y_1 = 0.096007\text{abrasivo} - 0.554153\text{arena} + 1.63925\text{cemento} \quad R^2_{\text{ajustado}} = 99.8294$$

En este caso todas las variables resultaron significativas para un 99%, siendo la variable más significativa el cemento. Es de destacarse que la arena influyó de manera negativa sobre los resultados, lo cual puede estar motivado por su menor dureza con relación al abrasivo.

Para la variable respuesta Y_2 (resistencia a la caída libre) se obtuvo el siguiente modelo:

$$Y_2 = 0.00065\text{abrasivo} - 0.15306\text{arena} + 0.81363\text{cemento} \quad R^2_{\text{ajustado}} = 94.1735$$

En el caso de la variable Y_2 la variable más significativa resultó ser la cantidad de cemento, lo cual está motivado porque éste constituye el aglomerante encargado de unir mediante el fraguado los diferentes granos de abrasivo.

En los anexos número 1 y 2 se pueden observar todos los datos del procesamiento estadístico de los resultados para ambas variables.

3.5- Evaluación económica y medio ambiental de la producción de abrasivos.

3.5.1- Evaluación económica.

En la valoración económica se consideran los gastos en materiales, energía, transportación y mano de obra que se realizan para el procesamiento aluminotérmico de 1 tonelada de cascarilla para producir Al_2O_3 (corindón) y una aleación de hierro como subproducto. En la tabla 3.3 se pueden observar los datos utilizados en la valoración económica.

Para la evaluación económica se tomó como referencia la mezcla preparada en cantidades estequiométricas. A partir de la mezcla es factible obtener producir 0.7 ton de hierro metálico (chatarra) y 0.64 toneladas de Al_2O_3 (corindón). El hierro puede ser empleado como materia prima para la elaboración de acero o fundiciones y el Al_2O_3 en la elaboración de materiales abrasivos.

El precio de la chatarra de acero es de alrededor de 150 CUC por toneladas y el de los materiales abrasivos en polvo es de 500 CUC por toneladas.

Valor producido (Corindón): $0.64\text{ton} \times 500 \text{ CUC/ton} = 320 \text{ CUC}$

Valor producido (Chatarra): $0.7\text{ton} \times 150 \text{ CUC/ton} = 105 \text{ CUC}$

Total: 425 CUC

Ganancia: $425 - 70.32 = 354.68 \text{ CUC/ton}$ de cascarilla procesada.

El análisis de los resultados obtenidos permite afirmar que es factible desde el punto de vista económico el procesamiento aluminotérmico de estos residuales con el objetivo central de obtener materiales abrasivos.

Tabla 3.3: Datos utilizados para la valoración económica de la producción de abrasivos.

Concepto		Consumo	Precio	Consumo(\$)
Materias primas	Aluminio	0.34 ton	120.00 CUC/ton, 17.50 CUP/ton	40.8 CUC 5.95 CUP
	Cascarilla	1 ton	38 CUP/ton	38 CUP
Transportación		1.34 ton	19.72 CUP/ton 4.58 CUC/ton	6.14 CUC 26.42 CUP
Energía	Mezclado	11.76 kW-h	0.09 CUC/kW	19.4 CUC
	Secado	140 kW-h		
	Trituración	17.5 kW-h		
	Tamizado	2.5 kW-h		
Sub total				66.34 CUC 70.37 CUP
Mano obra	10-20% Costo producción			10.56 CUP
Mantenimiento y reparación	2-10% Costo producción			3.98 CUC
Total				70.32 CUC 80.93 CUP

3.5.2- Valoración medioambiental.

La producción de Al_2O_3 mediante el procesamiento aluminotérmico de cascarilla de laminación con el empleo de viruta de aluminio como reductor es un proceso que en su propia esencia considera los conceptos de tecnologías limpias.

Por una parte tanto la viruta de aluminio, como la cascarilla de laminación son residuales 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 reductivo es un material de excelentes propiedades abrasivas y alta demanda en la industria, mientras la aleación presenta características adecuadas como chatarra para la producción de aleaciones ferrosas.

Todos estos criterios sustentan las bondades de esta tecnología para el procesamiento de estos residuales.

3.6- Evaluación industrial.

Para evaluar desde el punto de vista práctico los resultados obtenidos se fabricaron varias muelas con granulometrías menores de 0.1 mm y otras con granulometrías entre 0.1 – 0.25 mm, las que fueron entregada a la ECOAIC No1 del MICONS, siendo evaluadas en el pulido de pisos.

Los resultados obtenidos con estos prototipos fueron satisfactorios, lográndose resultados equivalentes a los alcanzados con las muelas tradicionales.

Estos resultados motivaron el interés de dicha empresa razón por la cual se solicitó al CIS la posibilidad de entregar un volumen apreciable de polvos abrasivos para fabricar dichas muelas en sus Talleres, entregándosele aproximadamente 5 kg de material abrasivo con granulometría menor a 0.1 mm, rango de grano más deficitario en esta empresa actualmente.

En estos momentos se fabrican por parte del MICONS y bajo la asesoría del CIS estas nuevas muelas.

Todos estos aspectos validan la factibilidad técnico económica de realizar estas producciones en las condiciones técnico económicas existentes actualmente en Cuba.

Conclusiones generales

1. En la elaboración de diferentes herramientas abrasivas en la industria se emplea una amplia variedad de abrasivos base carburo de silicio y óxido de aluminio. Estas herramientas en Cuba son deficitarias por sus altos precios en el mercado internacional.
2. Las escorias aluminotérmicas reúnen los requisitos químicos físicos necesarios para ser utilizados como materias primas en el desarrollo de materiales abrasivos, lo que constituye una alternativa de desarrollo de estos productos en Cuba.
3. Las mezclas conformadas por cascarillas de laminación y virutas de laminación permiten recuperar el hierro presente en las mismas para ser empleado nuevamente en la industria y obtener escorias de alto contenido de Al_2O_3 (como producto principal) que pueden ser empleadas en el desarrollo de materiales abrasivos.
4. Las muelas abrasivas planas elaboradas a partir de las escorias aluminotérmicas, utilizando como aglomerante cemento Pórtland, cumplen con los requerimientos de calidad establecidos para su empleo en el pulido de pisos.
5. Desde el punto económico y ambiental la producción de Al_2O_3 resulta ventajosa. En el sentido económico se pueden obtener estimados de ganancia de 354.68 CUC/ton de cascarilla procesada. En el sentido ambiental se reduce la generación de residuales, tanto por el reaprovechamiento de los generados en otros procesos, como por la no generación de los mismos en la tecnología que se concibe.

Recomendaciones

- 1- Darle seguimiento a los resultados obtenidos por la Empresa ECOAIC No 1 del MICONS que está fabricando las muelas abrasivas a partir de los polvos abrasivos y las propuestas tecnológicas realizadas por el CIS.
- 2- Realizar un nuevo trabajo de diploma donde su objetivo central sea el estudio de la influencia del suministro de aire sobre los resultados del procesamiento aluminotérmico de las mezclas de virutas de aluminio y cascarilla de laminación.

Anexos

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Y1

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Abrasivo	0,096007	0,0190707	5,03427	0,0073
Arena	-0,554153	0,0508827	-10,8908	0,0004
Cemento	1,63925	0,038326	42,7713	0,0000

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	254,71	3	84,9033	1170,98	0,0000
Residual	0,290024	4	0,0725061		
Total	255,0	7			

R-squared = 99,8863 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 99,8294 percent
 Standard Error of Est. = 0,26927
 Mean absolute error = 0,136003
 Durbin-Watson statistic = 1,12637

The StatAdvisor

The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Y1 and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$Y1 = 0,096007 \cdot \text{Abrasive} - 0,554153 \cdot \text{Arena} + 1,63925 \cdot \text{Cemento}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 99,8863% of the variability in Y1. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 99,8294%. (Note: since the model does not contain a constant, you should be careful in interpreting the R-Squared values. Do not compare these R-Squared values with those of models which do contain a constant.) The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,26927. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,136003 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,0073, belonging to Abrasivo. Since the P-value is less than 0.01, the highest order term is statistically significant at the 99% confidence level. Consequently, you probably don't want to remove any variables from the model.

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Y2

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
Abrasivo	0,000646974	0,0483536	0,0133801	0,9900
Arena	-0,153063	0,129013	-1,18642	0,3011
Cemento	0,813631	0,0971752	8,37283	0,0011

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	46,1355	3	15,3785	32,99	0,0028
Residual	1,86448	4	0,46612		
Total	48,0	7			

R-squared = 96,1157 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 94,1735 percent
 Standard Error of Est. = 0,68273
 Mean absolute error = 0,352282
 Durbin-Watson statistic = 0,977294

The StatAdvisor

 The output shows the results of fitting a multiple linear regression model to describe the relationship between Y2 and 3 independent variables. The equation of the fitted model is

$$Y2 = 0,000646974 * \text{Abrasive} - 0,153063 * \text{Arena} + 0,813631 * \text{Cemento}$$

Since the P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level.

The R-Squared statistic indicates that the model as fitted explains 96,1157% of the variability in Y2. The adjusted R-squared statistic, which is more suitable for comparing models with different numbers of independent variables, is 94,1735%. (Note: since the model does not contain a constant, you should be careful in interpreting the R-Squared values. Do not compare these R-Squared values with those of models which do contain a constant.) The standard error of the estimate shows the standard deviation of the residuals to be 0,68273. This value can be used to construct prediction limits for new observations by selecting the Reports option from the text menu. The mean absolute error (MAE) of 0,352282 is the average value of the residuals. The Durbin-Watson (DW) statistic tests the residuals to determine if there is any significant correlation based on the order in which they occur in your data file. Since the DW value is less than 1.4, there may be some indication of serial correlation. Plot the residuals versus row order to see if there is any pattern which can be seen.

In determining whether the model can be simplified, notice that the highest P-value on the independent variables is 0,9900, belonging to Abrasivo. Since the P-value is greater or equal to 0.10, that term is not statistically significant at the 90% or higher confidence level. Consequently, you should consider removing Abrasivo from the model.

