



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE SOLDADURA**

TRABAJO DE DIPLOMA

**METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE
MUELAS ABRASIVAS SOBRE VÁSTAGO, A
PARTIR DE ESCORIAS ALUMINOTÉRMICAS Y
CEMENTO PORTLAND P-350**

Autor: OSBANY PALACIOS ARTEAGA.

Tutor: Dr. CARLOS R. GÓMEZ PÉREZ

Consultante: Ing. PABLO RODRÍGUEZ SOSA

Curso: 06-07

RESUMEN

El presente trabajo aborda una investigación en el desarrollo de muelas abrasivas sobre vástago, empleando residuales escorias aluminotérmicas y una mezcla de cemento Pórtland P-350 y agua. En el trabajo se hace referencia a las normas para el uso y control de la calidad de los materiales abrasivos, así como un análisis de los fundamentos teóricos más importantes sobre los mismos. La metodología desarrollada elimina el proceso de sinterización comúnmente aplicado durante la obtención de muelas abrasivas sobre vástago, al sustituir los aglutinantes de altas temperaturas por otros de endurecimiento a temperatura ambiente (cemento). En la tesis se estudia las relaciones entre los componentes de la mezcla, atendiendo a su desempeño durante el ensayo de pérdida de masa. Se incluye el diseño y fabricación de los moldes. En los prototipos de muelas abrasivas sobre vástago producidas el 41 % del costo total lo conforma el abrasivo; el 32 %, el costo del vástago metálico; mientras que sólo un 2 %, el cemento. El 25 por ciento restante se encuentra distribuido entre la mano de obra, la transportación y el consumo energético. La muela elaborada, a partir de una mezcla con 60 % escorias, 26,66 % cemento, y 13,34 % de agua destilada, presenta un comportamiento similar a muelas comerciales fabricadas por la firma NORTON. Su costo de fabricación unitario es de 0,022 CUC y 0,0036 CUP, con una ganancia unitaria de 0,48 CUC.

Palabras claves: Abrasivos, muelas sobre vástagos, escorias, cemento.

SUMMARY

The present work approaches an investigation in the development of abrasive wheels, using the aluminotermical residual and cement Portland P-350. Some standards for test control on the abrasive wheels are presented. The developed methodology eliminates the winterization process with the purpose of reducing the imports and diminishing the impact of environmental contamination. It is also carried out an experimental work with the purpose of studying the best mixture in the matters selected cousins, scum and agglutinants, assisting to acting during their exploitation. It is also included the design and production of the molds and a proposal of a rehearsal methodology, based in the loss of mass that would allow to select the best composition, taking as dependent variable the abrasive waste. In the thesis it is studied the relationships among the components of the mixture, assisting to their acting during the rehearsal of loss of mass. It is included the design and production of the molds. In the prototypes of abrasive wheels produced the 41 % of the total cost conforms it the abrasive; 32 %, the metallic offspring's cost; while alone 2 %, the cement. 25 remaining percent are distributed among the manpower, the transportation and the energy consumption. The elaborated molar, starting from a mixture with 60 % slag, 26,66 % cements, and 13,34 % of distilled water, it presents a similar behavior to commercial molars manufactured by the signature NORTON. Their unitary manufacturing cost is of 0,022 CUC and 0,0036 CUP, with an unitary gain of 0,48 CUC.

INDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i>	2
<i>CAPITULO I: ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE</i>	5
1.1. Tipos, de herramientas abrasivas	5
1.2. Clasificación y propiedades sobre muelas abrasivas	5
1.3. Tipos y aplicaciones de muelas abrasivas sobre vástago	7
1.4. Clasificación de abrasivos. Normas	10
1.4.1. Clasificación	10
1.4.2. Normas.....	10
1.4.3. Ejemplos de abrasivos.....	12
1.4.4. Características de los granos abrasivos.....	15
1.5. Tipos de aglutinantes.	16
1.6. Cemento Portland P-350.	17
1.7. Procedimientos clásicos de obtención de muelas abrasivas	18
1.8. Ensayos sobre muelas abrasivas	19
1.8.1. Ensayo de rigidez.....	19
1.8.2. Ensayo de abrasividad.....	20
1.9. Conclusiones parciales del Capítulo I	21
<i>CAPITULO II: DESARROLLO EXPERIMENTAL</i>	22
2.1. Selección de las materias primas utilizadas. Propiedades y características	22
2.1.1. Escoria proveniente de la reducción aluminotérmica de la pirolusita (abrasivo).	22
2.1.2. El Cemento Portland P-350 (aglutinante).....	25
2.1.3. Relación agua cemento	26
2.2. Criterios de selección de la región de experimentación.	28
2.3. Diseño y construcción de los moldes	30
2.4. Procedimiento de elaboración de las muelas abrasivas	32
2.5. Ensayos sobre muelas abrasivas	34
2.5.1. Ensayo de rigidez.....	34
2.5.2. Ensayo de abrasividad.....	36
2.6. Conclusiones parciales del Capítulo II	38

<i>CAPITULO III: RESULTADOS Y ANALISIS.....</i>	39
3.1. Resultados Experimentales y discusión.	39
3.2. Medidas de seguridad durante el trabajo con muelas abrasivas sobre vástago.	44
3.2.1. Medidas de seguridad preliminares	44
3.2.2. Manipulación y montaje de las muelas abrasivas	45
3.2.3. Comprobaciones necesarias antes de comenzar el trabajo	46
3.2.4. Requisitos a considerar durante el trabajo	46
3.2.5. Protección personal.....	47
3.2.6. Orden, limpieza y conservación.....	48
3.3. Criterios económicos.	48
3.3.1. Evaluación económica.	48
3.3.2. Valoración medioambiental.	50
3.4. Alcance de los resultados.	50
3.5. Conclusiones parciales del Capítulo III	51
<i>CONCLUSIONES GENERALES.....</i>	52
<i>RECOMENDACIONES.....</i>	53
<i>BIBLIOGRAFÍA.....</i>	54
<i>ANEXOS.....</i>	56

INTRODUCCIÓN

El Centro de Investigación de Soldadura tiene 20 años de fundado. Desde sus inicios trabaja en la obtención de materiales para soldar (electrodos y fundentes).

Hasta la fecha en el centro se ha diversificado la cantidad de tipos de materiales obtenidos. Esto responde no sólo a las satisfacciones del país, sino también a los intereses científicos propios del centro.

Para el desarrollo de los consumibles se han realizado estudios de obtención de ferroaleaciones, como otras alternativas tecnológicas para la obtención de materiales para soldar, tanto a través de procesos carbotérmicos, como de aluminotérmicos.

Como subproductos en la obtención aluminotérmica de ferromanganeso, a partir de la reducción de la pirolusita se obtiene una escoria, cuyas características le permiten ser valorada como posible material refractario y/o abrasivo.

Necesidad de la investigación:

Las muelas abrasivas sobre vástago se construyen para realizar desbaste en superficies metálicas y eliminar pintura u óxido en las mismas, que se encuentran en lugares de difícil acceso para discos abrasivos. También con el desarrollo de las muelas abrasivas sobre vástago se logra acceder a las superficies internas de los cilindros, ya sea para rectificarlos a diámetros mayores, como para la eliminación de escorias, salpicaduras y penetraciones procedentes de procesos de soldaduras. Esta posibilidad disminuye el tiempo y el esfuerzo humano, que se llevaría a realizar una operación de las antes mencionadas de forma manual con limas metálicas.

Sin embargo, las muelas abrasivas sobre vástago no se comercializan por firmas cubanas, lo que trae consigo su importación.

Por la necesidad de su uso en los talleres y de reducir importaciones surge la posibilidad de desarrollar un procedimiento, que permita obtener muelas abrasivas sobre vástago, que se sustente en el uso de materiales cubanos, con un mínimo impacto medioambiental, que sean capaces de cumplir con los mismos requisitos y que sirvan para las mismas aplicaciones, que las muelas de igual tipo, comercializadas por firmas prestigiosas.

Novedad de la investigación:

Empleo del cemento Portland P-350 como aglutinante para la elaboración de muelas abrasivas sobre vástago.

Alcance de la investigación:

Desarrollo de muelas abrasivas sobre vástago cilíndricas.

Hipótesis.

Es posible desarrollar muelas abrasivas sobre vástago, a partir de los subproductos del proceso de reducción aluminotérmica de la pirolusita, empleando como aglutinante cemento Portland P-350 y agua.

Objetivo general:

Obtener prototipos de muelas abrasivas sobre vástago para el desbaste y limpieza de piezas de acero de bajo contenido de carbono y baja aleación, a partir de la utilización de la combinación de los compuestos de corindón y galaxita, contenidos en la escoria del proceso de reducción aluminotérmica de la pirolusita, y empleando la mezcla de cemento Portland P-350 y agua como aglutinante.

Como ***objetivos específicos*** del trabajo se presentan los siguientes:

1. Emplear materias primas minerales cubanas en la fabricación de muelas abrasivas sobre vástago, que constituyan desechos industriales y que reduzcan los consumos energéticos habituales del proceso de producción.
2. Construir el equipamiento de laboratorio necesario, que permita la obtención de prototipos y el estudio de muelas abrasivas sobre vástago.
3. Desarrollar una metodología, que permita la obtención de muelas abrasivas sobre vástago, a partir de escorias y cemento.

Para el desarrollo de los objetivos antes referidos se plantea la realización de las siguientes **tareas**:

1. Clasificación de las muelas abrasivas sobre vástago en función de su aplicación y materiales empleados en su fabricación.
2. Determinar los tipos de abrasivos que en el mundo se comercializan, y sus normas de producción y evaluación.
3. Diseño y construcción de los moldes necesarios para la obtención de las muelas abrasivas sobre vástago.
4. Desarrollo de una metodología para la obtención de muelas abrasivas sobre vástago mediante un estudio experimental de prototipos.
5. Seleccionar y evaluar los constituyentes de muelas abrasivas sobre vástago atendiendo a la capacidad abrasiva de la muela terminada.

CAPITULO I: ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE

1.1. Tipos de herramientas abrasivas

Para satisfacer las diferentes exigencias presentadas en la elaboración precisa de las piezas y otras aplicaciones, las herramientas abrasivas se fabrican de configuración estructural y tamaños diferentes. Las herramientas abrasivas se hacen, en lo fundamental, en forma de discos de varios perfiles y dimensiones, barras, placas, segmentos, así como en forma de polvos, granos esmeril, de distintas dimensiones y calidades, y lijas [6].

Las herramientas abrasivas pueden ser producidas para realizar labores en objetos o piezas metálicas, como las construidas por los materiales antes mencionados, o no metálicas para allanar, alisar, pulir mármol, muela, granito, cerámica, vidrio, madera. En las metálicas, se emplean en la limpieza de piezas fundidas, superficies de acero en general. Por medio de estas herramientas se pueden trabajar todos los metales, desde los más blandos (aluminio), hasta los más duros (aceros aleados), que precisen un acabado de sus superficies, entre otras aplicaciones [27].

1.2. Clasificación y propiedades sobre muelas abrasivas

Las muelas abrasivas pueden clasificarse según la forma de empleo del abrasivo, sus formas geométricas, etcétera. Según su forma de empleo y forma geométrica se pueden clasificar en: polvos abrasivos, pastas abrasivas, papeles abrasivos, telas abrasivas, muelas de forma circulares, segmentos abrasivos, barras abrasivas, muelas de vástago, etc., (ver figura 1.1) [13].

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 se emplean para la limpieza superficial de piezas fundidas; en materiales no metálicos, se emplean en acabado, pulido, desbaste de pisos, entre otros tipos de materiales.



Figura 1.1.: Tipos de muelas abrasivas.

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, en la figura 1.2 se muestra como puede ser la disposición de los granos.

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.

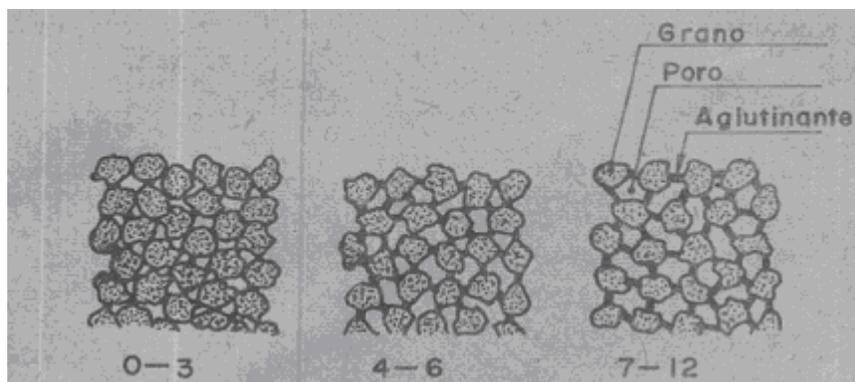


Figura 1.2.: Disposición de los granos, poros y aglutinantes en la estructura de los materiales abrasivos.

El desempeño adecuado 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 cuentan con propiedades mecánico-físicas 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 fuerza centrífuga.
- Baja resistencia a la fractura y al agrietamiento.

1.3. Tipos y aplicaciones de muelas abrasivas sobre vástago

Las muelas abrasivas sobre vástago son herramientas que se emplean generalmente en la realización de desbaste en superficies metálicas y la eliminación de pintura u óxidos en las mismas que se encuentran en lugares de difícil acceso para discos abrasivos y muelas abrasivas cilíndricas de mayores dimensiones (ver figura 1.3). También con el desarrollo de las muelas abrasivas sobre vástago se logra acceder a las superficies internas de los cilindros, ya sea para rectificarlos a diámetros mayores, como para la eliminación de escorias, salpicaduras y penetraciones procedentes de procesos de soldaduras, disminuyendo el tiempo y el trabajo humano, que se llevaría a realizar una operación de las antes mencionadas de forma manual con limas metálicas.



Figura 1.3.: Muela abrasiva sobre vástago en operación de desbaste.

Existen diferentes tipos de muelas abrasivas sobre vástago y estas se clasifican fundamentalmente según:

1. Su forma geométrica en: cilíndricas, cónicas y esféricas,
2. Por su aplicación en: muelas para desbaste pesado, desbaste leve, semi – terminado, terminado y pulido.
3. Según su granulometría: por un número, que referencia el tamaño del grano [1]:
 - 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

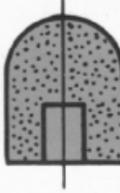
Probablemente la propiedad más importante es la granulometría, que mide el tamaño del grano. Se expresa inversamente al tamaño del grano; es decir: cuanto mayor es la numeración, tanto menor será el tamaño del grano (ver tabla 1.1)

Tabla 1.1: Relación de la granulometría con la clase granulométrica de la muela abrasiva.

Grano V/S tamaño en mm			
Grano	Tamaño en mm	Grano	Tamaño en 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		

En la tabla 1.2: se muestra ejemplos de muelas abrasivas sobre vástago.

Tabla 1.2: Ejemplos de muelas abrasivas sobre vástago.

Tipo de herramienta abrasiva	Croquis de la sección
Cónicas con ángulo del cono de 60°	
Abovedadas	
Cónicas con la cúspide redondeada	
Esféricas	
Esféricas con superficie lateral cilíndrica	

1.4. Clasificación de abrasivos. Normas

1.4.1. Clasificación

Los materiales abrasivos son aquellos, 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. Los abrasivos pueden tener diferentes formas, perfiles y dimensiones [2].

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 1.4. [24].

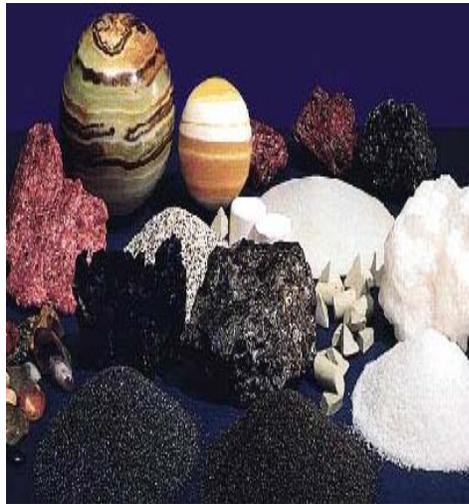


Figura 1.4: Ejemplos de abrasivos.

1.4.2. Normas

Existen varias normas, con diferente nivel de especificación y alcance, las cuales difieren en algunas particularidades. Debido a esto se encaminará el tema a referir los métodos usados en las normas de clasificación.

La norma CAMI se usó en los Estados Unidos por la respectiva asociación de fabricantes. Como toda norma, el sistema y sus procedimientos fueron diseñados para determinar la uniformidad de sus productos.

Esta norma no tenía equivalencia hasta promediando los años '70. Por entonces, desde Europa se comenzó a comercializar productos hacia EEUU. Frente a la oportunidad del negocio, nació la norma FEPA.

La norma FEPA (Federación Europea de Fabricantes de Productos Abrasivos), como era de esperar, utiliza un procedimiento distinto a la clasificación granulométrica de la 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 de la norma FEPA. Rápidamente, la norma tomó consideración comercial. La idea que se popularizó fue que era de excelente resultado y removía más material.

Al potenciar los negocios, algunos fabricantes optaron por usar una medida, si bien familiar con una connotación comercial, el MICRON. Una nueva norma de nomenclatura, pero una nueva complicación.

La norma MICRA deriva de la palabra Micrón. El término micrón resultó muy atractivo para los potenciales clientes. Decir de un producto 30 Micrones daba mayor cartel, que usar un grano 360 del CAMI ó P500 de FEPA. ¡Pero eran lo mismo!

Desde Oriente se establece la norma JMS. La norma JMS (Japanese Industrial System o Sistema Industrial Japonés) estableció otro sistema de clasificación.

Existen normas cubanas que tratan el tema, dentro de las cuales se encuentran la norma Cubana NC 19 – 02 – 16, de 1983, del Sistema de Normas de Protección e Higiene del Trabajo, de la República de Cuba, la cual establece los requisitos generales de seguridad para el trabajo con herramientas abrasivas y la Norma Cubana NC 57-25, de 1983, “Herramientas Abrasivas. Selección” [3].

En lo adelante se expondrá una recopilación de recomendaciones de una de las normas más significativas a escala mundial e industrial, la Federación Europea de Fabricantes de Productos Abrasivos (FEPA) para dos de los principales abrasivos usados en la industria: el carburo de silicio y óxido de aluminio [12].

La norma citada define los tamaños de granos en función del número de mallas por pulgada lineal que contiene el tamiz medio, utilizado en la clasificación. Cuanto más fino es el grano, menor el tamaño del tamiz y mayor el número en la escala, ver figura 1.5.



Figura 1.5.: Granos de óxido de aluminio y carburo de silicio. FEPA – estándar 42 – 1984 R 1993: Medidas de granos para discos de desbaste y otras aplicaciones de abrasivos

El tamaño de los granos de una granulometría determinada no es uniforme, sino que contiene un porcentaje de mayor y menor tamaño alrededor del nominal. Así, un # 80 contiene un porcentaje de # 70 y otro de # 90. De forma rápida, se acostumbra, sin embargo, a definir un grano por el Tamaño Medio de Partícula. Por ejemplo, un grano # 36, tiene un Tamaño Medio de Partícula de 0,530 mm, mientras que para un grano # 80, el valor es de 0,180 mm [23].

Estas medidas indican que, aproximadamente el 50 % de una muestra tomada de los granos citados, tiene la dimensión que se señala y que en cada caso existirán porcentajes más bastos y más finos, que el tamaño medio [1].

1.4.3. Ejemplos de abrasivos

Carburo de Silicio.

Es un mineral sintético de color negro brillante y de elevada dureza. Durante su uso se fractura en partículas de filosas aristas, que proporcionan una rápida y uniforme remoción del material. Este abrasivo es recomendado para el acabado de metales no ferrosos, como el bronce, el cobre y el aluminio; y de otros materiales, tales como el cuero, el vidrio, la madera, el hule y el plástico.

Óxido de Aluminio Especial.

El óxido de aluminio especial es un mineral sintético basado en la fusión de óxido de aluminio de alta pureza, el cual ha sido tratado térmicamente a temperaturas muy elevadas, mejorando sustancialmente sus características de dureza y friabilidad. El desempeño del óxido de aluminio especial mantiene en las aplicaciones, aristas cortantes, que trabajan a temperaturas menores. Su aplicación se recomienda para

operaciones de lijado en materiales de alta resistencia a la tensión, como son: aceros, aceros inoxidable y bronce duros. También es muy efectivo para el desbaste de materiales de baja resistencia a la tensión, como aceros de bajo contenido de carbón, aluminio y bronce, resultando en tiempos de vida más prolongados y reduciendo los costos de lijado.

Óxido de Aluminio Blanco

Es un abrasivo sintético y durable, que se caracteriza por la larga vida de sus aristas filosas, recomendado para el lijado de maderas duras, así como en la industria maderera en general.

Óxido de Aluminio Café

Este grano abrasivo está formado por cristales de gran tamaño. Se caracteriza por sus aristas duras, filosas y tenaces; se usa para el lijado y pulido de materiales de alta resistencia a la presión, tales como aceros al carbono, aceros inoxidable, bronce duros, etc., siendo muy efectivo aun para el desbaste de un sinnúmero de materiales de baja resistencia a la tensión, como son: acero, aluminio, bronce, especialmente cuando se usan presiones de lijado de normales a pesadas.

Existen diferentes tipos de abrasivos, entre ellos los naturales, que son los que se utilizan, tal y como se encuentran en la corteza terrestre con ciertos procesamientos de 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 superabrasivos. [21].

Dentro del grupo de materiales abrasivos de ingeniería, uno de los más importantes que se pueden encontrar, es el de las cerámicas o fases cerámicas, que abarcan una amplia variedad de sustancias. Para mencionar algunas están: el vidrio, los ladrillos, la muela, el concreto, la porcelana esmaltada, los materiales magnéticos no metálicos, los refractarios y entre muchos otros los abrasivos.

Todos estos materiales tienen un rasgo característico común, son compuestos de metales y no metales; por tanto, la clasificación de los materiales cerámicos es amplia,

tal que se incluyen no solamente los óxidos y silicatos, sino también todos los materiales inorgánicos no metálicos, como los carburos duros. . [28].

La gran mayoría de los minerales cerámicos, estructurándolos como fases, al igual que los metales, tienen estructuras cristalinas. En su estructura están presentes elementos metálicos y no metálicos con enlaces covalentes ó iónicos. Esto significa que son estructuras que no tienen muchos electrones libres. Los electrones están compartidos covalentemente 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, su temperatura de fusión en promedio es más alta, que la de los materiales metálicos u orgánicos y son más resistentes a la alteración química. En general son malos conductores, tanto eléctricos, como térmicos.

Sus estructuras cristalinas son bastante complejas, lo cual sumado a la mayor resistencia de sus enlaces químicos, hacen lentas las reacciones químicas cerámicas. Dentro de todos aquellos compuestos cerámicos, que tienen interés como materiales abrasivos, son: el SiC (carburo de silicio), el Al₂O₃ (óxido de aluminio o corindón). Sus propiedades se encuentran entre las de los materiales cerámicos y de los metálicos y como compuestos son semimetálicos. Los materiales abrasivos tienen un amplio uso en la producción de diferentes herramientas para la elaboración de los metales de acabado, a esmerilar, etcétera [17].

En general, los granos abrasivos están caracterizados por sus elevadas resistencias al corte, con lo cual no son dúctiles; sus propiedades son producto de sus estructuras cristalinas. Dentro de estas propiedades se encuentran:

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

Para evaluar algunas de estas propiedades en los granos, como por ejemplo: la dureza, actualmente se utilizan ensayos de micro-dureza. Para los cerámicos, la dureza se puede definir como la resistencia a la acción de ser rayado. Sobre la base de este concepto fueron creados la escala de Mohs y el “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 otro, con un número menor. Es decir, el más alto raya al más bajo, en la tabla 1.3 se ofrecen los valores para comparar la micro-dureza en la escala de Mohs [26].

Tabla 1.3.: Tabla de la 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

1.4.4. Características de los granos abrasivos

Dentro de las características más sobresalientes de los abrasivos se encuentra la dureza, la tenacidad y la friabilidad [20].

La **dureza** puede ser definida como la resistencia a la acción del rayado. Basada en este concepto fue creada la conocida escala Mohs, ya mencionados, 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.

La **tenacidad** es la capacidad que poseen los granos abrasivos 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 [30].

La **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.

1.5. Tipos de aglutinantes.

Los aglutinantes o aglomerantes son los diferentes materiales adherentes, que se mezclan con los granos y polvos abrasivos para constituir la masa, que forma la muela abrasiva.

En la fabricación y elaboración de herramientas abrasivas los aglutinantes, constituyen la formulación de la mezcla para cumplir las propiedades, parámetros y exigencias establecidos para el uso y aplicación de las muelas abrasivas. Para esto se usan aglutinantes que se funden a baja y alta temperatura.

Para fabricar las herramientas abrasivas se emplean dos grupos de aglutinantes fundamentales: inorgánicos (de cerámica), y orgánicos (de baquelita y vulcanita) [19].

Los **aglutinantes cerámicos**, comparados con otros, tienen una mayor resistencia al calor, a la humedad y mayor resistencia química. Las muelas hechas con aglutinantes cerámicos conservan bien el perfil de su arista activa, pero son sensibles a las cargas de choque y flexión, especialmente cuando la muela tiene un pequeño espesor. Las muelas con aglutinante cerámico pueden trabajar a una velocidad circunferencial no superior a 3 500 r.p.m, ya que son muy frágiles y se rompen con facilidad debido a los choques. Las muelas de tipo especiales con aglutinante cerámico pueden trabajar a una velocidad circunferencial de hasta 5 000 r.p.m. Los aglutinantes cerámicos se emplean en la producción de muelas, segmentos, barras y cabezales abrasivos. Estas herramientas se utilizan para todos los tipos de esmerilado, excepto para las operaciones de corte y de elaboración de canales estrechos [4].

Las muelas abrasivas con **aglutinante de baquelita** tienen una alta resistencia mecánica y elasticidad; permiten trabajar a la velocidad circunferencial hasta de 5 000 r.p.m y en caso de trabajo con discos delgados con una velocidad hasta de 7 500 r.p.m. Con aglutinante de baquelita se producen muelas, segmentos y barras abrasivas, que

se emplean para cortar o hacer canales estrechos, para el esmerilado del acero templado, afilado de las herramientas, esmerilado plano por medio de un juego de discos hechos de segmentos y barras, esmerilado perfilado y acabado y rectificado de cilindros y roscas [5].

Las muelas abrasivas con **aglutinante de vulcanita** tienen mayor elasticidad y menor resistencia térmica, que las muelas con aglutinante de baquelita. A temperatura superior a 150 °C, el aglutinante de vulcanita se ablanda y los granos se hunden en el interior de éste. Las muelas abrasivas con aglutinante de vulcanita no pueden utilizarse para quitar grandes sobre-espesores debido a que tienen una estructura de alta densidad. Con aglutinante de vulcanita se producen muelas de disco, muelas planas y cabezales. Estas muelas se emplean para cortar o hacer canales estrechos, para cortar o esmerilar las superficies esféricas, en las operaciones del acabado, esmerilado perfilado y esmerilado [6].

1.6. Cemento Portland P-350.

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 [8].

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 kgf.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 [7]. Así por ejemplo:

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

Existen en Cuba otras normas para las especificaciones de calidades de cementos.

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 Portland de Alta Resistencia Inicial. Especificaciones.

NC 101:2001 Cemento Portland Blanco. Especificaciones.

1.7. Procedimientos clásicos de obtención de muelas abrasivas

Los documentos y patentes de fabricación de materiales abrasivos son clasificados; es decir, no es posible tener acceso a informaciones claves para desarrollar un proyecto de investigación, con el objetivo de obtener herramientas abrasivas. Por ejemplo, no se ha podido acceder a documentación para consulta sobre las temperaturas a las que se someten durante el proceso de sinterización y endurecimiento de la muela, y ni del material abrasivo, en consecuencia de cada aplicación, ni sobre las cantidades cuantitativas y cualitativas de aglutinantes, que fusionan a bajas y/o a elevadas temperaturas, ni sobre la presión a la que se someten durante el proceso de compactación en el molde, ni sobre el grado de compactación, etcétera.

En Cuba se encuentra una 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 esta empresa se desarrolla la fabricación de muelas abrasivas planas y cilíndricas, principalmente. El material abrasivo, es el corindón, importado desde Francia, con un 90 % de alúmina y de color blanco. La fábrica cuenta con un consumo anual de corindón de unas 130 toneladas, compradas a un precio entre 500 - 600 USD el año anterior.

La materia prima (material abrasivo, corindón) se resecciona y se conserva en sacos de 25 kg en almacenes ventilados; con una granulometría entre 32 - 36 mech. Generalmente de este tamaño de grano tienen un consumo anual de 40 toneladas [3].

La metodología clásica de preparación de las muelas abrasivas mediante el proceso de compactación y sinterización se muestra a continuación:

1. Directo del saco se vierte en una mezcladora horizontal, el material abrasivo y los aglutinantes, según la cantidad que corresponda, en por ciento de masa. La mezcladora cuenta con 3 operaciones.
2. Con los materiales vertidos en la mezcladora, un rodillo apisona la mezcla, que está constituida aproximadamente con una cantidad de 3:1 de aglutinantes (silicato de sodio y feldespato) y la masa seca, (el corindón, con cerca de un 10 por ciento de masa).
3. La masa apisonada por los rodillos, en la misma posición horizontal es destruida por un tridente. Luego se recolecciona la masa revuelta por una paleta, que la lleva nuevamente hasta los rodillos de apisonar. Este proceso ocurre durante 30 minutos.
4. Después de realizar el mezclado de los componentes, la mezcla se vierte en el molde, la cual es comprimida en ambos sentidos, con una carga de 36 toneladas de presión.
5. Concluido el proceso de compresión de la mezcla, se saca a presión del molde. Luego se coloca al aire durante o por más de 24 horas.
6. En lo adelante se procede a realizar la sinterización de las muelas en un horno cámara de combustión de fuel – oil. La sinterización de las muelas se realiza a 1200 ° C, durante 4 horas, dejándose reposar un tiempo de 24 horas.
7. Por último se extraen las muelas del horno, enfriadas, dentro de este, y se separan las que posean defectos, para ser destruidas, y las que no tienen defectos, para realizarles los chequeos y ensayos de control de calidad.

1.8. Ensayos sobre muelas abrasivas

Se han encontrado algunos de los principales ensayos, que se realizan a las muelas abrasivas antes de su entrega para la venta o el uso.

1.8.1. Ensayo de rigidez

Este ensayo se basa en someter a las muelas a velocidades superiores, que las permitidas para su explotación; tiene como duración 5 minutos para muelas con

diámetros exteriores desde 200 – 500 mm y no menor que 7 minutos, para aquellas con diámetros superiores a 500 mm.

En algunos casos se permite reducir el tiempo hasta un 33 %, como por ejemplo, para muelas, cuyas velocidades periféricas de trabajo no excedan de $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y para muelas donde el aglutinante sea baquelita y la velocidad de trabajo no exceda los $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

No será necesario someter al ensayo de rigidez, si la muela contiene aglutinante vitrificado u orgánico, siempre que sus velocidades periféricas de trabajo no sean mayores que $25 - 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [12].

1.8.2. Ensayo de abrasividad

Este consiste en introducir el vástago de cada muela abrasiva en el husillo de una rectificadora recta haciéndola girar a velocidades periféricas superiores al los $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y hacer incidir sobre las muelas una probeta de acero AISI-1020. Este ensayo se basa en la relación de pérdida de masa de las muelas y de las probetas, para ver cual de los prototipos de las muelas abrasivas es el más abrasivo.

Según la bibliografía especializada [12], los ensayos deben realizarse en las condiciones siguientes:

- Por parte de los fabricantes antes de su entrega.
- Cuando las herramientas hayan sido sometidas a tratamientos químicos, térmicos o mecánicos.
- Se realizarán en bancos especiales instalados sobre fundamentos provistos de una cámara aislada, que ofrezca seguridad en caso de rotura de la herramienta.
- En el local donde se haga el ensayo se fijará una detallada instrucción para la ejecución del mismo. No se permitirá la realización de otros trabajos paralelamente no relacionados con la preparación y ejecución del ensayo.

1.9. Conclusiones parciales del Capítulo I

1. Los principales materiales empleados como abrasivos son: el vidrio, los ladrillos, el concreto, la porcelana esmaltada, el corindón, el diamante, entre otros. Sin embargo, no se ha reportado el empleo de residuales del proceso de reducción aluminotérmica de la pirolusita como abrasivos.
2. Los principales aglutinantes más empleados para la confección de muelas abrasivas son: los cerámicos, los de vulcanita y los de baquelita. No se reporta en la literatura especializada el empleo del cemento como aglutinante de muelas abrasivas sobre vástago.
3. Dentro de los parámetros fundamentales a considerar, para la fabricación clásica de herramientas abrasivas se encuentran: la relación porcentual entre los componentes, la presión y su tiempo de permanencia, así como las temperaturas de los procesos de sinterización. No se conoce cuáles serían para la obtención de muelas abrasivas a partir de una mezcla de escorias, cemento Portland P-350 y agua.
4. Los ensayos realizados a las muelas abrasivas sobre vástago son los mismos aplicados a las muelas abrasivas cilíndricas, dentro de los cuales se encuentran los de desgaste y de rigidez, los cuales dependen de la velocidad periférica de las muelas abrasivas y del tipo de aglutinante empleado en su fabricación.

CAPITULO II: DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. Selección de las materias primas utilizadas. Propiedades y características

En este trabajo, para la elaboración de las mezclas en la fabricación de muelas abrasivas sobre vástago, se utilizan tres productos fundamentales como materias primas; estos son: la escoria procedente del proceso de reducción aluminotermia de la pirolusita, como abrasivo y la mezcla de cemento Portland P-350, producido en Cuba, y el agua, como aglutinantes. La selección de estos materiales está encaminada a la obtención de herramientas abrasivas utilizando materias primas cubanas, para reducir importaciones. De esta forma se logra el aprovechamiento de este material disminuyendo la contaminación medioambiental por la eliminación del vertido de estos residuos.

2.1.1. Escoria proveniente de la reducción aluminotérmica de la pirolusita (abrasivo).

La escoria constituye el principal componente, la cual es obtenida como subproducto del proceso de reducción por aluminotermia de la pirolusita, procedente del Yacimiento “Margarita de Cambute”, en Santiago de Cuba. Una vez concluido el proceso aluminotérmico, todo el material contenido en el reactor (metal – escoria), se vierten en agua. Por choque térmico se obtienen ambos productos fragmentados 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 un segundo molino de martillo, que tritura estos materiales hasta granulometrías por debajo de 1 mm.

Las escorias poseen una composición de más del 60 % de corindón u óxido de aluminio y galaxita o aluminato de manganeso [22].

El corindón se ha utilizado tradicionalmente en la industria en la elaboración de diferentes materiales abrasivos. En la tabla 2.1: se muestran una serie de propiedades y características de este material [4].

Tabla 2.1: Propiedades y características del corindón.

Nombre del mineral	Corindón
Tipo básico	Óxidos
Grupo	De las Hematites
Sistema Cristalino / Estructura	Trigonal, hexagonal Formado por cristales prismáticos hexagonales.
Composición química	Contiene el 52,9% de aluminio, pequeñas cantidades de cromo le dan coloraciones rojas, mientras que hierro y titanio le dan coloración azul alta temperatura de fusión insoluble.
Formación u origen	Se forma por la unión de dos minerales: rubí y zafiro.
Dureza	9
Textura	En bandas, dura y lisa.
Densidad	3,98 a 4,10 g/cm
Color	Muy variado desde el rojo oscuro del rubí, hasta el azul del zafiro.
Propiedades	Este mineral forma alargados cristales bipiramidales, prismáticos, tubulares (cortos y largos), o romboédricos. También se da en agregados masivos y granulares. El corindón puede tener muchos colores. Es entre transparente y translúcido; tiene un brillo entre vítreo y adamantino.
Gráfico del mineral	

La composición química de las escorias determinada mediante fluorescencia de Rayos X se muestra en la tabla 2.2 [15].

Tabla 2.2: Composición química de las escorias.

Al ₂ O ₃	58,5	Fe ₂ O ₃	2,5	MgO	8,87	C	0,065	SrO	0,12
MnO	22,2	Cr ₂ O ₃	0,19	BaO	0,51	Na ₂ O	0,69	S	0,039
SiO ₂	7,8	CaO	2,1	K ₂ O	0,28	TiO ₂	0,16		

La determinación de la densidad aparente se realiza en un frasco (probeta) de 25 ml. Después de extraer la humedad de la probeta, en esta se echa una porción de muestra de material, que se vierte mediante una pequeña cuchara. Luego de verter el material dentro, siempre echando aproximadamente la misma cantidad, se pesa en una balanza, vertiendo la muestra sobre papel de filtro. Esta operación se repite, como mínimo cinco veces [17]. En éste caso se hicieron 10 repeticiones, como se muestra en la tabla 2.3.

El cálculo se determina por las expresiones 1 y 2.

$$\rho_{.i} \equiv \frac{\text{peso}(g)}{\text{voloumen}(ml.)} \quad (1)$$

$$\rho_{APARENTE} \equiv \sum_{i=1}^{n=10} \frac{\rho_i}{n} \quad (2)$$

Donde:

ρ_i es la densidad para cada punto experimental (i).

Tabla 2.3: Densidad aparente de la escoria (material abrasivo)

TABLA DE VALORES			
Número de los experimentos	Peso (g)	Volumen (ml)	Densidad (g·ml ⁻¹)
1	43,343	25	1,7337
2	42,931	25	1,7124
3	43,000	25	1,7200
4	43,106	25	1,7242
5	43,068	25	1,7227
6	43,000	25	1,7200
7	43,000	25	1,7200
8	43,200	25	1,7280
9	43,448	25	1,7379
10	43,573	25	1,7429
Promedio:	43,167	25	1,7261

2.1.2. El Cemento Portland P-350 (aglutinante)

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, estringtonita y monosulfato. El sucesivo endurecimiento y el desarrollo de fuerzas internas de tensión derivan de la reacción más lenta del agua con el silicato de tricálcio 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 (SiO_2). Las tres reacciones generan calor (exotérmicas) [9].

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 3CaOSiO_2 , y luego $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ y finalmente 2CaOSiO_2 .

Los requisitos que tienen que cumplir los diferentes grados de Cemento Portland, así como los métodos de ensayo a emplear aparecen en la tabla 2.4 [7].

Tabla 2.4: Requisitos de los grados de Cemento Portland.

Índice	Requisitos	UM	P-350	P-450	P-550	Método de ensayo
Físicos	Retenido en el tamiz 4 900 (máx.)	%	10	8	6	NC 54-207
	Superficie específica Blaine (mín.)	cm ² .g ⁻¹	2 800	2 900	3 200	
	Tiempo fraguado inicial (mín.)	Min	45	45	45	
	Tiempo fraguado final (máx.)	H	10	10	10	
	Estabilidad de volumen por Le Chatelier (máx.)	Mm	10	10	10	
Mecánicos	Resistencia a la flexiótracción (mín.) 3 días	Kgf.cm ⁻² (MPa)	30 (3)	50 (5)	50 (5)	
	7 días		40 (4)	60 (6)	-	
	28 días		60 (6)	70 (7)	75 (7,5)	
	Resistencia a la compresión (mín.) 3 días	Kgf.cm ⁻² (MPa)	170 (17)	250 (25)	250 (25)	
	7 días		250 (25)	350 (35)	-	
	28 días		350 (35)	450 (45)	550 (55)	
Químicos	Pérdida por ignición (máx.)	%	4,0	4,0	4,0	NC 54-206
	Residuo insoluble (máx.)	%	4,0	4,0	4,0	
	Oxido de Magnesio (máx.)	%	5,0	5,0	5,0	
	Trióxido de Azufre (máx.)	%	3,5	3,5	3,5	

El producto se aceptará si los resultados de ensayos cumplen con los requisitos de la tabla 2.4.

2.1.3. Relación agua cemento

Según la Asociación nacional de fabricantes de aditivos para morteros [8] se debe utilizar la menor cantidad de agua posible en el amasado de morteros, debido a que el agua sobrante de la hidratación saldrá de la masa generando un producto poroso, permeable con malas propiedades mecánicas y de resistencia.

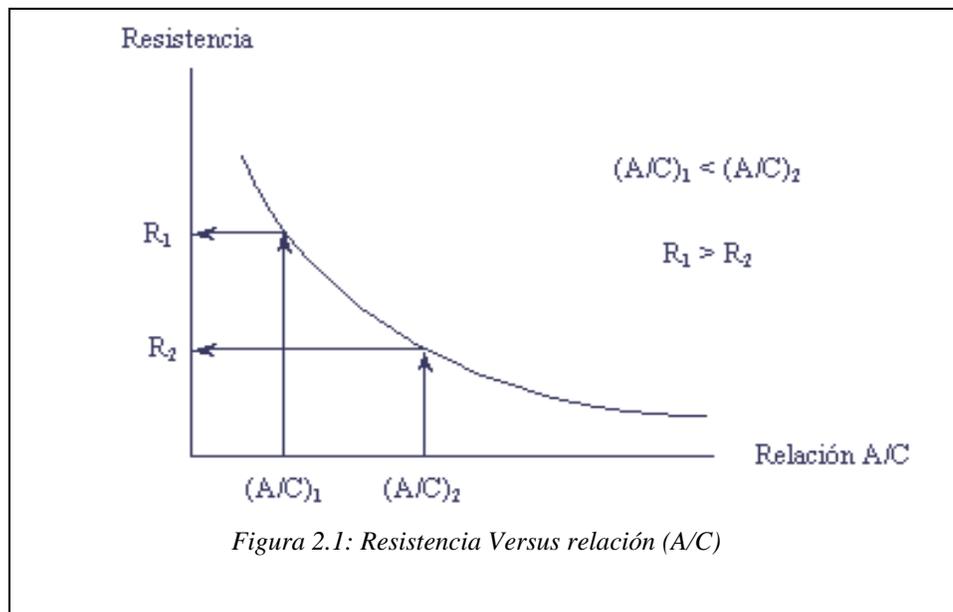
La mínima relación agua/cemento para un mortero es de aproximadamente 0,25, o lo que es lo mismo 1 parte de agua por 4 partes de cemento. Si se aumenta la relación agua/cemento, bien añadiendo agua, disminuyendo la cantidad de cemento o haciendo ambas cosas a la vez, las masas se mezclan con más facilidad, pero por el contrario, provocan que las propiedades del producto en estado endurecido se deterioren. Por lo tanto, existe un compromiso al seleccionar las cantidades de agua en relación a la cantidad de cemento [9].

Si la relación (A/C) agua/cemento es baja se obtiene en estado fresco una trabajabilidad deficiente y en estado endurecido, si se compacta adecuadamente, altas

resistencias mecánicas y durabilidad. Si la relación (A/C) agua/cemento es por contrario alta se obtiene en estado fresco buena trabajabilidad, posible exudación o sangrado y segregación de componentes. Y en estado endurecido se obtiene porosidad y bajas resistencias mecánicas.

De lo anterior se deduce que el factor de mayor importancia en la resistencia del mortero es el cociente entre la cantidad de agua de amasado y la de cemento.

Este cociente se denomina relación Agua/Cemento (abreviada A/C) y se expresa como fracción en peso de los materiales. Para un tipo de cemento, a menor relación A/C mayor resistencia (ver Figura 2.1).



Según la literatura especializada, la relación agua - cemento influye en la resistencia al desgaste abrasivo [10]. Los resultados de pruebas indican que la resistencia a la abrasión o desgaste está estrechamente relacionada con la resistencia a la compresión de la mezcla. Así, por ejemplo, un concreto de alta resistencia a compresión tiene mayor resistencia a la abrasión que un concreto de resistencia a compresión baja. Un agregado duro es más resistente a la abrasión que un agregado blando y esponjoso. Se ha determinado que la relación cemento-arena se sitúa entre 0,4 y 0,6 para la arena seca. La experiencia ha demostrado que este valor debería acercarse a 0,6 [9].

2.2. Criterios de selección de la región de experimentación.

En el desbaste de piezas y superficies de difícil acceso se emplean diferentes máquinas herramienta de pequeños tamaños, las que usan muelas abrasivas sobre vástago con dimensiones y formas diferentes. Una máquina herramienta, como es el caso de una rectificadora recta para desbastar, requiere de una sola muela abrasiva para realizar su trabajo. La muela se coloca en la máquina introduciéndole el vástago en el interior del husillo de ésta, quien la sujeta a presión por medio de unas estrías autocentrantes, que son reguladas por una rosca, evitando durante su funcionamiento que no se separe la muela abrasiva con vástago y no provoque accidentes, ni se rompa. Durante la explotación, las muelas abrasivas sobre vástago normalmente están sometidas a altas velocidades y reciben golpes moderados.

Como se planeó en el capítulo 1, la función de los aglutinantes es la de soportar estas cargas y permitir el autoafilado de los granos. Dentro de los aglutinantes no convencionalmente empleados para este fin se encuentra el cemento Portland P-350, pero que reúne los requisitos fundamentales para ser evaluado como aglutinante en las muelas abrasivas sobre vástago.

Este aspecto permite estudiar la posibilidad de la conformación de dichas muelas sustituyendo el aglomerante clásico (silicato de sodio junto a otras sustancias inorgánicas) por cemento Portland P-350, evitando así la realización de la tan compleja y costosa operación de sinterización.

A partir de este criterio se decide realizar un diseño de experimento, donde se estudia la conformación de una mezcla, utilizando como aglomerante una mezcla de cemento Portland P-350 y agua [13].

Para el estudio de las proporciones adecuadas entre los diferentes componentes a adicionar a la mezcla se aplica un sencillo método experimental, consistente en tomar como consideración el comportamiento de la mezcla de los componentes agua, cemento y escoria como un mortero. Producto de que existe similitud entre los productos de relleno (arena – abrasivo) utilizados en la elaboración de morteros y muelas abrasivas, respectivamente. Después de tomar la consideración antes mencionada, se selecciona el rango de variación de la región de experimentación, de

forma que contenga inscrito el rango de la composición de las mezclas para morteros referidos en las normas, más algunos criterios basados en experiencias prácticas.

Para los experimentos se toma como variable independiente la escoria, variándose entre 45 % y 65 %. El resto se completó con una mezcla de agua y cemento, cuya relación (A/C) es de un 0,5.

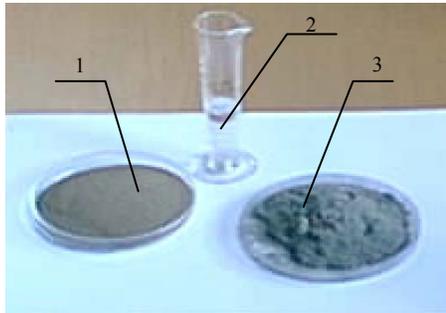
Con todos estos elementos se confecciona la matriz experimental a desarrollar, siendo necesario realizar 5 experimentos para cada granulometría. La matriz experimental completa se muestra en la tabla 2.5, para las granulometrías de desbaste grueso y leve (36 y 54), respectivamente.

Tabla 2.5: Plan experimental completo para dos granulometrías de desbaste en por ciento de masa de los materiales propuestos ().*

Operación	Desbaste grueso					Desbaste medio				
Tamaño de grano	Granulometría-36					Granulometría-54				
Número de experimento	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
% de escoria	45	50	55	60	65	45	50	55	60	65
% de cemento	36,57	33,3	30,00	26,66	23,33	36,57	33,3	30,00	26,66	23,33
% de agua	18,3	16,7	15	13,34	11,67	18,43	16,7	15	13,34	11,67
Cantidad de escoria (g)	24,55	30,00	36,67	45,00	55,71	24,55	30,00	36,67	45,00	55,71
Cantidad de cemento (g)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Cantidad de agua (g)	10,00	10,00	10,00	10,00	20,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00

(*) Relación Agua/cemento = 0,5

En la figura 2.2 se muestra una foto donde se relacionan las materias primas empleadas en la confección de las muelas abrasivas sobre vástago.



- 1.- Escoria (abrasivo)
- 2.- Agua
- 3.- Cemento (aglutinante)

Figura 2.2: Materias primas empleadas en la confección de las muelas abrasivas sobre vástago

2.3. Diseño y construcción de los moldes

El diseño y fabricación de los moldes está en función de las dimensiones de las muelas abrasivas sobre vástago a obtenerse. Los moldes deberán tener todos los requisitos y aditamentos auxiliares posibles, que permita hacer más fáciles los pasos durante el proceso de elaboración de la muela abrasiva.

El molde deberá poseer, además, cierta resistencia mecánica, para que no se rompa o se deforme durante el proceso de manipulación o de compactación de la mezcla y buen acabado superficial, para lograr un mejor desmoldeo de las muelas abrasivas, evitando que éstas no se rompan o se deformen y cumplan con las exigencias de funcionamiento y presencia.

El diámetro del vástago para la elaboración de la muela abrasiva está normalizado en función del diámetro exterior de la muela abrasiva [13].

Para muelas abrasivas sobre vástago de diámetro y altura iguales a 20 y 25 mm, respectivamente, el diámetro del vástago es de 6 mm. La longitud del vástago se toma de 30 mm.

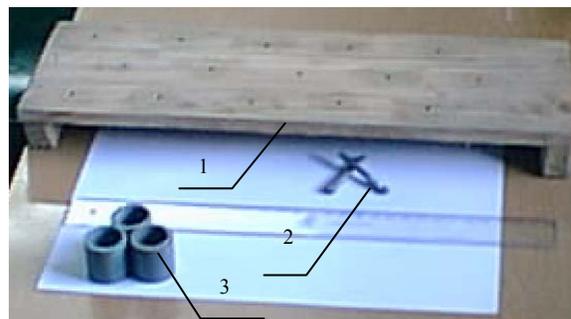
Se selecciona un material polímero para la confección del molde (para las camisas que darán lugar a la forma de la muela abrasiva), por ser este material fácil de trabajar y no humectante. Las camisas se recortaron en un torno 10 cilindros, de PVC de 20 mm de diámetro interior a 25 mm de longitud.

El soporte se construyó de madera con las siguientes dimensiones: 150 mm de ancho, por 300 mm de longitud y 10 mm de altura. Al soporte se le realizaron 10 agujeros pasantes de 6,5 mm de diámetro a una separación de 30 mm uno del otro, con un

arreglo cuadrado. A los extremos del soporte se fijaron con puntillas 2 patas paralelas entre sí de 100 mm de largo, 20 mm de espesor y 40 mm de altura, que constituyen las bases del molde. Para sostener los vástagos se recorta un sostén de madera, de 260 mm de longitud, 150 mm de ancho y 10 de espesor, de forma tal que entre ajustado, para fijarlo con puntillas a las bases.

Luego, se introducen los vástagos de 6 mm de diámetro y 4,2 cm de longitud en los orificios, después se colocan los cilindros en el soporte, y se fijan a este con cera de abejas, de forma concéntrica con los vástagos.

En la figura 2.3 se muestra la instrumentación fundamental para la confección del molde para obtener las muelas abrasivas sobre vástago y en la figura 2.4 se muestra una foto de muelas abrasiva sobre vástago con distintas formas [16].



- 1.- Soporte
- 2.- Vástagos
- 3.- Camisas

Figura 2.3: Instrumentación empleada en la confección de las muelas abrasivas sobre vástago



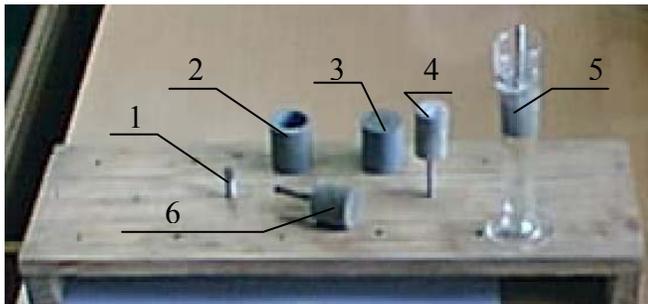
Figura 2.4: Ejemplo de muelas abrasivas sobre vástago.

2.4. Procedimiento de elaboración de las muelas abrasivas

De acuerdo a las proporciones propuestas en la tabla 2.5 se prepararon las diferentes mezclas. Para la experimentación se mantuvo fija dos granulometría de escorias, que fueron tamizadas a tamaño 36 y otra 54, con los rangos entre (0,600 – 0,420) mm y (0,350-0,250) mm, respectivamente.

Para la experimentación se prepararon diez probetas cilíndricas, referidas en la tabla 8, con diámetro 20 mm y 25 mm de longitud, sobre vástagos de 6 mm de diámetro y 30 mm de longitud. Los Vástagos son deformados por un moleteado, a partir de uno de los extremos a una distancia de 15 mm con el objetivo de crear en éstos mayor sujeción con la mezcla de cemento Portland P-350 y agua.

Para la confección de las muelas sobre vástago se siguió el siguiente procedimiento, el cual se refleja en la figura 2.5.



1. Vástago
2. Camisa
3. Mezcla en verde
4. Muela en verde
5. Proceso de curado
6. Muela terminada

Figura 2.5: Secuencia de pasos para la elaboración de muelas abrasivas sobre vástago.

- a) Se pesa por separado la cantidad de gramos, según los puntos experimentales para cada componente: cemento, agua y escoria.
- b) Se realiza el mezclado de los sólidos (cemento y escoria), en una mezcladora durante 5 minutos. Luego se terminan de mezclar con el agua.
- c) Se hace el montaje de las camisas en el soporte, embadurnando de grasa sus paredes internas, donde se verterá la mezcla
- d) Se introducen primero los vástagos en el soporte dejando la parte moleteada hacia arriba, luego se fijan las camisas con cera al soporte, de forma tal, que

estas queden concéntricas con los agujeros, utilizando compases de precisión para emplazar.

- e) Posteriormente, se hace el vertido de la mezcla compactándola lo mayor posible, se deja que la mezcla sobrepase el molde 2 mm de la parte superior, ya que estas mezclas presentan contracciones.
- f) Al cabo de 45 mín, se debe enrazar el molde, si fuese necesario y posteriormente extraer la muela abrasiva del interior del mismo.
- g) Después se lleva a cabo un proceso de texturización de la muela abrasiva, que consiste en un tratamiento mecánico superficial, que elimina la capa exterior de cemento de la muela para la afloración de los granos de abrasivo.
- h) Las muelas deben ser sumergidas en agua (curado) durante 28 días.
- i) Luego se sacan del agua y se ponen a secar durante 24 horas.
- j) Posteriormente se procede realizar los ensayos de control propuestos para estas herramientas.

En la figuras 2.6 a y 2.6 b, se muestran las vistas superior y frontal de las muelas abrasivas sobre vástago, colocadas sobre el soporte, después de curadas y secadas.



Figura.2.6 a: vista superior de las muelas abrasivas sobre vástago.



Figura 2.6 b: Vista frontal de las muelas abrasivas sobre vástago.

2.5. Ensayos sobre muelas abrasivas

2.5.1. Ensayo de rigidez

Este ensayo se basa en someter a las muelas abrasivas a velocidades superiores a las recomendadas para su explotación, tiene como duración 5 minutos para muelas abrasivas con diámetro inferiores a 200 mm.

La velocidad periférica máxima de rotación de la muela abrasiva se determina según la ecuación 8 [14]:

$$V = \frac{\pi * D * n}{60} \text{ (m.s}^{-1}\text{)}, \quad (8)$$

donde:

D es el diámetro exterior de la muela abrasiva sobre vástago (m),

n es el número de revoluciones por minuto a la que gira la muela abrasiva (rpm)

En la tabla 2.6 se pueden observar las velocidades de ensayo para distintos diámetros de muelas abrasivas, según el tipo de aglutinante empleado para su fabricación.

La presente investigación se realiza para muelas de diámetro 0,02 mm, con aglutinante de cemento Portland P-350, que puede ser comparado, en su comportamiento, con los aglutinantes cerámicos [12].

Tabla 2.6: Velocidad de ensayo recomendada para los fabricantes de muelas abrasivas

Tabla de velocidades (rpm)					
Diámetro mm	Vitrificados 33 m.s ⁻¹	Resinoides 48 m.s ⁻¹	Diámetro mm	Vitrificados 33 m.s ⁻¹	Resinoides 48 m.s ⁻¹
50,8	12,414	18,143	254,00	2,483	3,629
76,2	8,276	12,006	304,80	2,069	3,023
101,60	6,207	9,072	355,60	1,773	2,592
127,00	4,966	7,258	406,40	1,552	2,268
152,40	4,138	6,048	457,20	1,379	2,016
177,80	3,547	5,183	508,00	1,241	1,814
203,20	3,103	4,535	609,60	1,034	1,152

Como se puede apreciar en la tabla 2.6, el diámetro menor es de 50,8 mm, no reflejándose diámetros inferiores a éste. Por ello resulta necesario, determinar la velocidad de ensayo adecuada o el diámetro para el cual la piedra cumple con a velocidad periférica exigida por la norma. Un cálculo más preciso sería empleando la fórmula que relaciona las velocidades angulares (n) y periféricas (V), (ecuación 8).

Despejando el diámetro en la ecuación 8:

$$D = \frac{60 * V}{\pi * n} \quad (9)$$

Sustituyendo en 2: $n = 30000 \text{ rpm}$ y $V = 33 \text{ m.s}^{-1}$

$$\frac{60s * 33m.s^{-1}}{3,14 * 30000rpm} = 0,021m$$

Para un mejor factor de seguridad el diámetro es normalizado con un valor por encima del calculado: $D = 0,022 \text{ m}$. Recalculando velocidad periférica de la muela abrasiva:

$$D = 0,022 \text{ m}; \quad n = 30000 \text{ rpm}$$

$$V = \frac{\pi * D * n}{60} = \frac{3,14 * 0,022 * 30000}{60} = 34,54m.s^{-1}$$

Como se observa, para comprobar la rigidez de las muelas abrasivas sobre vástago aglutinadas con cemento Portland P-350, se debe ensayarse prototipos de diámetro 22 mm a una velocidad de rotación de 30 000 rpm para velocidades periféricas de $34,54 \text{ m.s}^{-1}$.

En la figura 2.7 se muestra la instalación empleada para la realización del ensayo.

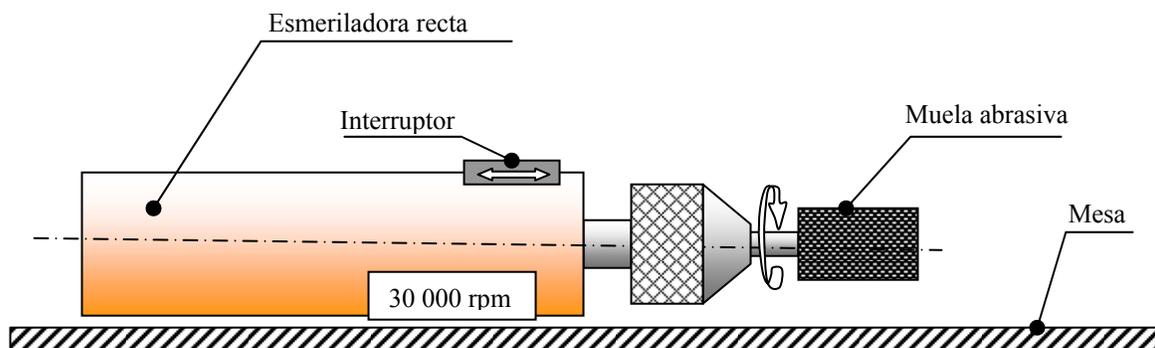


Figura 2.7: Equipamiento para el ensayo de rigidez de las muelas abrasivas sobre vástago.

2.5.2. Ensayo de abrasividad

Este consiste en introducir el vástago de cada muela abrasiva en el husillo de una rectificadora recta de 30 000 rpm y hacer incidir, sobre la muela, una probeta de acero AISI-1020. Este ensayo se basa en la relación de pérdida de masa de las muelas y de las probetas.

Para la experimentación se prepararon 5 muelas abrasivas con granulometría 36 y 5, con grano número 54, para un total de 10 prototipos de muelas abrasivas a ensayar. Las muelas abrasivas tienen un diámetro de 20 mm y una longitud de 25 mm. La probeta cilíndrica es de diámetro 20 mm, por 15 mm de altura. Las muelas abrasivas fueron obtenidas en el laboratorio de materiales del CIS, de la UCLV y la probeta metálica se elaboró en el taller de maquinado de la facultad de Ingeniería Mecánica, de la UCLV.

El ensayo de abrasividad se realiza atendiendo a criterios de pérdida de masa durante el funcionamiento. El ensayo de pérdida de masa se explica a continuación.

Una vez obtenidas las 10 muelas abrasivas, 5 para cada aplicación (desbaste grueso y medio), respectivamente se procede a realizar el ensayo de desgaste, que consistió en hacer rotar cada muela abrasiva, sometiéndola a fricción con una probeta de acero al carbono AISI 1015, cuya muestra metalográfica se observa en la figura 2.8. Este acero se selecciona por constituir uno de los más empleados en la fabricación de estructuras y componentes mecánicos, que requieren ser soldados.

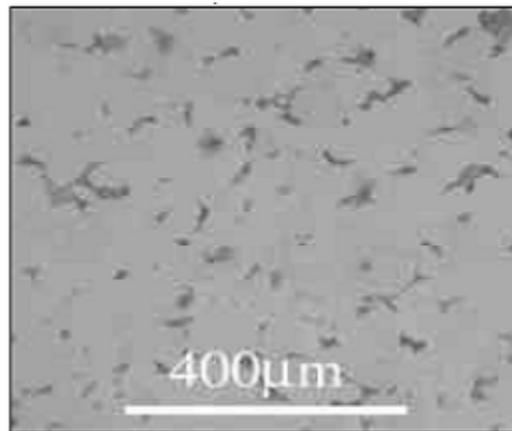


Figura 2.8: Estructura del acero AISI 1015.

Durante el ensayo se mantiene inmóvil la probeta de acero. La muela abrasiva se hace rotar a 30000 rpm en una rectificadora plana. Al ponerse en contacto la muela probeta metálica con la muela abrasiva, por la acción de la fricción relativa, se produce una pérdida de masa en ambas partes, dado por un desprendimiento de partículas. Por diferencia de peso se determina cuál es la magnitud del desgaste en ambos cuerpos. Para la comparación de ambos desgastes se introduce el término de desgaste relativo, que se calcula según la ecuación 10.

$$DR = \frac{\Delta_M}{\Delta_P} \cdot 100 \quad (10)$$

Donde:

Δ_M es la diferencia de peso entre la muela abrasiva antes del ensayo y después del ensayo

Δ_P es la diferencia de peso entre la probeta de acero antes del ensayo y después del ensayo

Este índice de desgaste relativo permite establecer un criterio de cuál es el punto de mejores condiciones abrasivas y, por tanto, poder seleccionar la mejor composición de la muela abrasiva. El tiempo de duración de este ensayo fue de 2 min para cada experimento.

En la figura 2.9 se encuentra un esquema de la disposición del equipamiento para la realización del ensayo.

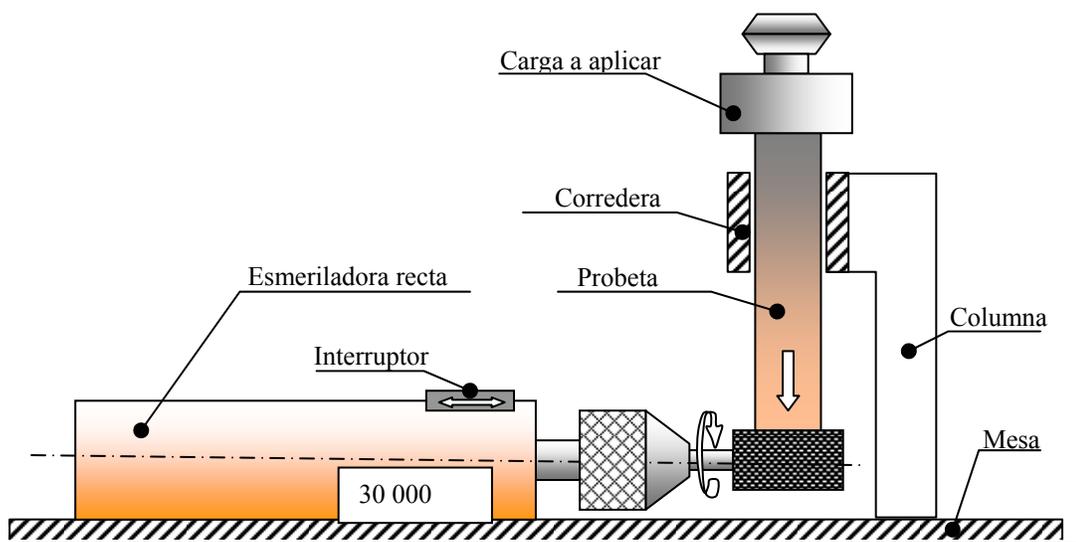


Figura 2.9: Equipamiento empleado para el ensayo de abrasividad.

2.6. Conclusiones parciales del Capítulo II

1. El carácter no puzolánico de la escoria obtenida del proceso de reducción aluminotérmica, con una composición de más del 60 % de corindón u óxido de aluminio y galaxita o aluminato de manganeso, permite que no reaccione químicamente con el cemento Portland P-350, al igual que ocurre entre los abrasivos y los aglutinantes convencionales, pero que conforma un aglutinante vitrificado.
2. Para la fabricación de muelas abrasivas sobre vástago es necesario tener en cuenta la relación porcentual entre los componentes alrededor de 1:3 y el tamaño de grano, manteniendo constante la relación agua/cemento igual a 0,5.
3. Para evaluar la efectividad de las proporciones entre el abrasivo y el aglutinante empleado resulta importante mantener constantes el tiempo de permanencia en agua o curado y el acabado en el interior de las camisas.
4. El ensayo de abrasividad es adecuado para evaluar el comportamiento de los prototipos de muelas abrasivas sobre vástago, permitiendo el índice de desgaste relativo (DR) aislar los resultados experimentales de la influencia de las condiciones de experimentación, lo que posibilita la comparación entre los diferentes prototipos de muelas abrasivas sobre vástago estudiadas.

CAPITULO III: RESULTADOS Y ANALISIS.

3.1. Resultados Experimentales y discusión.

Según la tabla 1, el rango granulométrico de perteneciente al tamaño de grano 36 se encuentra entre 0,600-0,420 mm, lo que aporta una clase granulométrica de 0,51, mientras que para el tamaño de grano No 54, el rango granulométrico se encuentra entre 0,350-0,250 mm, con una clase de 0,3. La relación porcentual entre ambas clases granulométricas es de un 70 por ciento, lo que representa el crecimiento de tamaño de la clase del grano mayor seleccionado, respecto a la del menor. Por otra parte la clase de los granos No. 36 es 1,7 veces superior a la de los granos con tamaño No 54. Estas diferencias indican lo alejado que se encuentran los tamaños de grano seleccionados y la representatividad de los mismos para evaluar su influencia independiente en la confección de las muelas abrasivas sobre vástago.

Según la tabla 4 debieran ser usadas velocidades angulares superiores a los 12414 rpm en el caso de ensayo de muelas abrasivas de diámetro 20 mm. Sin embargo, se explica en el capítulo 2, no se reglamentan velocidades para este tipo de ensayo. En este capítulo se demuestra que la velocidad de ensayo requerida para garantizar la velocidad periférica de 33 m.s^{-1} en muelas de 22 mm de diámetro es de 30000 rpm.

Las muelas abrasivas evaluadas, correspondientes a todas las formulaciones preparadas, tanto las de grano 36, como las de grano 54, sobrepasaron ampliamente la prueba, al soportar más de 5 min de trabajo en las condiciones antes referidas, sin mostrar señales de agrietamiento, ni de vibraciones en la unión entre el vástago u la muela abrasiva.

Este aspecto demuestra que la mezcla de cemento Portland P-350 y agua, a una relación agua/cemento igual a 0,5, permite la confección de morteros con escorias del proceso aluminotérmico de reducción de las pirolusita, que cumple con los requisitos del ensayo de rigidez exigido a las muelas abrasivas sobre vástago.

Para la evaluación comparativa del desgaste relativo se toma como patrón una muela abrasiva sobre vástago. Esta muela abrasiva es de tipo comercial y responde a las exigencias producidas por la firma Norton. A esta muela abrasiva sobre vástago se le

denominará en lo subsiguiente Patrón. Sus características fundamentales son: Diámetro 20 mm, Largo 25 mm, No. 36.

En la tabla 3.1 se muestran los valores de las masas de las probetas de acero y de las muelas abrasivas antes y después del ensayo. Se incluyen también los índices de desgaste relativo.

Tabla 3.1: Registro experimental del desgaste abrasivo.

Aplicación	No exp	Masa Muela (g)			Masa probeta (g)			Desgaste relativo ^(*) (%)
		Antes	Después	Δ_M	Antes	Después	Δ_P	
Desbaste Grueso No 36	1	27,32	26,65	0,67	43,85	43,4	0,45	149
	2	28,42	28,02	0,4	43,4	42,9	0,5	80,00
	3	27,19	26,93	0,26	42,9	42,35	0,55	47,27
	4	28,75	28,39	0,36	42,75	41,45	1,3	27,69
	5	28,29	27,9	0,39	41,45	40,83	0,62	62,90
Desbaste Leve No 54	1	27,45	27,33	0,12	40,83	40,75	0,08	150,00
	2	28,9	28,52	0,38	40,75	40,06	0,69	55,07
	3	27,83	27,61	0,22	40,06	39,46	0,6	36,67
	4	27,26	27,04	0,22	39,46	38,87	0,59	37,29
	5	24,46	24,16	0,3	38,87	38,32	0,55	54,55
	Patrón	12,33	12,1	0,23	38,32	37,83	0,49	46,94

$$(*) DR = \frac{\Delta_M}{\Delta_P} \cdot 100, \quad (\%)$$

Como puede apreciarse en la tabla 3.1 el desgaste en las muelas abrasivas sobre vástago (Δ_M) es inferior en todos los casos al de las probetas de acero (Δ_P) (excepto los puntos 1, de las muelas abrasivas con granulometría No 54 y No 36), lo cual se debe a que existe en estos puntos un mayor porcentaje de mezcla agua-cemento, que de escorias. En los puntos citados anteriormente el comportamiento del desgaste relativo es similar (149 y 150) a pesar de poseer distintas granulometrías, lo que explica que el carácter abrasivo de las muelas que conforman estos puntos está dado por el aglutinante empleado y no por la granulometría empleada.

En la figura 3.3 se muestra el gráfico que relaciona los desgastes relativos entre las probetas de acero y de muelas abrasivas. En esta figura se observan dos zonas (superior e inferior), divididas por el desgaste relativo característico de la mezcla patrón (recta horizontal). La zona superior representa la región de desgaste relativo poco

productivo de las muelas abrasivas con granulometrías 36 y 54. El área inferior muestra la región de desgaste productivo, que se encuentra con valores de desgaste relativo inferiores a los de la muela patrón. En esta zona las muelas abrasivas estudiadas manifiestan un comportamiento mejor que el de la muela abrasiva sobre vástago, tomada como patrón.

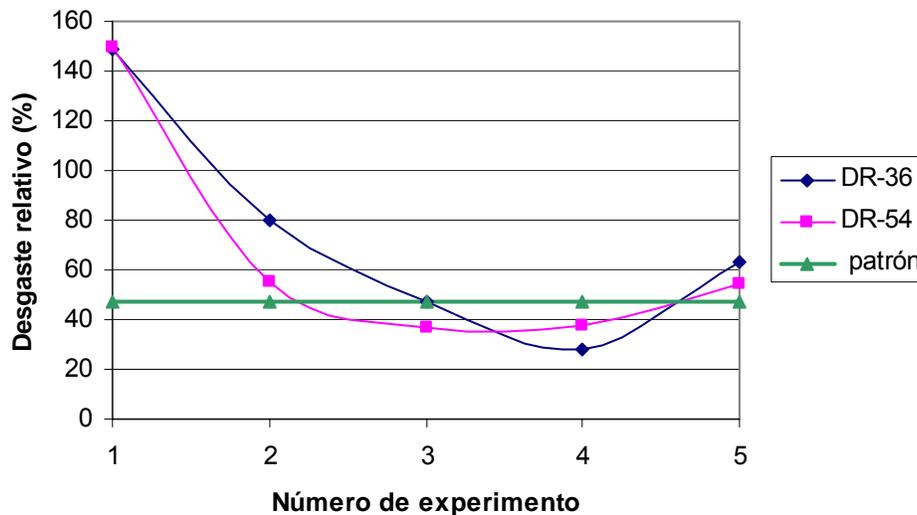


Figura 3.3: Desgaste Relativo (DR) entre las probetas de acero y de muelas abrasivas.

Los valores inferiores de las curvas de la figura 3.3 representan los puntos de inflexión de la pendiente del desgaste relativo. Las regiones ubicadas hacia la izquierda de los puntos señalados para ambas curvas, muestran las zonas en las cuales se experimenta un decremento progresivo de la productividad, como consecuencia del embotamiento de los granos de la muela abrasiva generado por el exceso de aglutinante, lo que impide el desprendimiento de los mismos. Los puntos que se encuentran hacia la derecha reflejan el inicio de la pérdida paulatina de la productividad debido a la liberación excesiva de los granos por la falta de adherencia del aglutinante. Como puede observarse, existen puntos experimentales que poseen desgastes relativos superiores e inferiores a los de la muela abrasiva sobre vástago tomada como patrón. Los puntos más significativos resultan los que poseen desgastes relativos similares o inferiores. En este caso se encuentran los puntos 3 y 4, tanto para tamaños

de grano 36, como 54. Un ejemplo del funcionamiento del punto experimental 3 de las muelas abrasivas con granulometría 54 puede observarse en la figura 3.4.



Figura 3.4: Foto del proceso de desbaste empleando la muela abrasiva del punto 3, grano No. 54.

En la tabla 3.2 se pueden apreciar las diferencias relativas entre las muelas abrasivas sobre vástago, elaboradas y el patrón.

Tabla 3.2: Diferencia relativa entre las muelas sobre vástago, elaboradas y el patrón, en %.

Diferencia relativa entre las muelas y el patrón, en %. ^(*)		
No	No 36	No 54
1	217,43	219,56
2	70,43	17,32
3	0,70	- 21,88
4	- 41,01	- 20,56
5	34,00	16,21

^(*) Los valores negativos (en amarillo) representan una eficiencia de corte superior de las muelas abrasivas estudiadas, respecto a la considerada como patrón. En verde, el punto que se considera con un comportamiento similar al de la muela patrón.

En la tabla anterior puede apreciarse que el punto 3, de la muela abrasiva elaborada con grano No 36 es el que se corresponde con un desgaste relativo similar al de la muela abrasiva patrón. Sin embargo, los prototipos de muelas abrasivas elaborados con grano No 54, poseen desgastes relativos en por cientos más aceptables ($\leq 22\%$),

que las diferencias entre los desgastes relativos entre las muelas abrasivas elaboradas con grano 36.

En la figura 3.1 se muestra la probeta de acero AISI-1015, después del ensayo, y en la figura 3.2, el punto experimental 3 de las muelas abrasivas sobre vástago obtenidas con granulometría 54.



figura 3.1: Probeta de acero AISI-1015



figura 3.2: Muelas abrasivas sobre vástago

Para las muelas abrasivas sobre vástago es un factor muy importante el proceso de desprendimiento del grano, lo que potencia su autoafilado. Debido a ello, en los casos en que las muelas abrasivas poseen una pérdida de masa relativa menor, respecto a la probeta, se observa que esta última se desbasta durante un proceso térmico intenso, quemando el metal. Esto se produce por un proceso de embotamiento de la superficie de la piedra con metal en estado plástico, lo que conduce al incremento local de la temperatura.

En el caso en que se observa una pérdida de masa relativa mayor, respecto a la probeta, se observa que esta última se desbasta sin calentamiento excesivo, es decir, conservando el color propio del material. Esto se debe, a que a pesar de que el proceso de desbaste es puramente friccional, se produce un desprendimiento de los granos que pierden el filo en la muela abrasiva, no originando embotamiento en la misma, ni la elevación extrema de la temperatura.

Para un adecuado proceso de corte abrasivo, se necesita que los granos sin filos se desprendan, pero sólo ellos; es decir, los que aún poseen filo no deben desprenderse. Esto presupone que deba existir un equilibrio, el cual es regido por la capacidad de fijación del aglutinante. De aquí la importancia de la muela patrón, que sobre la cual se

supone efectuaran un estudio preliminar en este sentido. Considerando este aspecto, la variante adecuada resulta la número 3, de grano No. 36, con una relación de pérdida de masa de 47,27 %, mientras que la del patrón es de 46,94 % (sólo 0,7 de diferencia entre ambas). Sin embargo, no debe perderse de vista la diferencia que existe entre el tipo de abrasivo empleado en el patrón y el de las muestras estudiadas. Tampoco la influencia de la relación agua/cemento.

En este sentido, se observa en la figura 3.3, que los puntos 4 y 3 de las granulometrías 36 y 54 respectivamente, correspondientes a contenidos de 60 % de abrasivo en la mezcla, conforman muelas sobre vástago en las que se obtiene mayores niveles de abrasividad en las probetas de acero y menor desgaste de las muelas. Este aspecto produce cortes más económicos, al desgastarse menos las muelas abrasivas sobre vástago, que las probetas de acero. En este caso el fenómeno no se explicaría por el debilitamiento de los granos por la carencia del abrasivo, sino por el decremento de la compactación entre los granos, originando espacios que sirven como receptores de limallas, que al girar la muela, se expulsan, sin que se retengan y emboten la piedra, como cuando el contenido de cemento en ella es mayor.

3.2. Medidas de seguridad durante el trabajo con muelas abrasivas sobre vástago.

3.2.1. Medidas de seguridad preliminares

1. Los interruptores y pulsadores de mando de las máquinas herramientas de muela abrasiva, se han de asegurar para que no sean accionados involuntariamente; las arrancadas involuntarias han producido muchos accidentes.
2. Todas las defensas de la maquinaria se mantendrán en su lugar, y cuando se quiten, para efectuar reparaciones por ejemplo, se reemplazarán nuevamente antes de poner la máquina en marcha.
3. Las comprobaciones, mediciones, correcciones, sustitución de piezas y cualquier otra operación, deben realizarse con la máquina completamente parada.

4. Debe usarse una pantalla transparente e inastillable, que permita ver el trabajo a su través y evitar lesiones en los ojos por proyección de pequeñas partículas de la muela o trozos de metal de la pieza que se mecaniza.
5. Siempre que sea necesario, las máquinas herramientas de muela abrasiva deben disponer de un sistema de aspiración del polvo que se produce en determinados trabajos.

3.2.2. Manipulación y montaje de las muelas abrasivas

Las muelas abrasivas son herramientas delicadas. De su buen estado y correcta manipulación y montaje depende en gran parte la seguridad.

La manipulación y montaje de las muelas debe realizarse con el mayor esmero, observando las siguientes reglas:

1. Las muelas deben almacenarse en lugares que no soporten temperaturas extremas y que deben mantenerse siempre secos.
2. En espera de ser empleadas las muelas deben permanecer protegidas, en estanterías que permitan seleccionarlas y cogerlas sin dañarlas, sin siquiera tocar las demás.
3. Manejar con cuidado las muelas, evitando que caigan o choquen entre si. No hacerlas rodar.
4. Utilizar siempre muelas en buen estado y de características adecuadas a la máquina y a los requerimientos del trabajo que se va a realizar; diámetro máximo y mínimo aceptable del eje de la máquina, velocidad máxima de trabajo, grano del abrasivo, dureza (grado), aglomerante, forma...
5. Bajo ningún concepto debe sobrepasarse la velocidad máxima de trabajo admisible de la muela, que debe estar claramente indicada en la etiqueta de la misma.
6. Las muelas que no lleven las indicaciones obligatorias (grano, grado, velocidad máxima, diámetro máximo y mínimo, etc.) deben ser retiradas del servicio.
7. Antes de montarla en la máquina, se examinará la muela para comprobar que no ha sufrido deterioro durante el transporte o la manipulación. Golpearla ligeramente con una pieza no metálica; debe producir un sonido claro. Si el

sonido es mate o cascado, puede significar la existencia de grietas; esa muela deberá ser retirada para un examen más meticuloso.

8. Las muelas deben entrar libremente en el eje de la máquina. No deben entrar forzadas ni con demasiada holgura. Es necesario que el diámetro del agujero de la muela sea ligeramente mayor que el del eje de la máquina, de forma que la muela se monte sin esfuerzo, pero no demasiado floja.
9. Apretar suficientemente la tuerca para sujetar el vástago y evitar su desprendimiento durante su empleo.
10. Todas las muelas nuevas deben girar a la velocidad de trabajo y con un protector puesto, al menos durante un minuto, antes de aplicarlas al punto de trabajo. Durante este tiempo no debe haber ninguna persona en línea con la abertura del protector.

3.2.3. Comprobaciones necesarias antes de comenzar el trabajo

Antes de poner la máquina en marcha para comenzar el trabajo, deben realizarse las siguientes comprobaciones:

1. Que la muela está bien ajustada y sujeta.
2. Que no hay nada que estorbe a la muela en su movimiento rotativo.
3. Que la pieza a mecanizar está firmemente sujeta al dispositivo de sujeción, para que no pueda salir despedida.
4. Que la pantalla transparente de protección contra proyecciones en el rostro se encuentra en buen estado.
5. Que no hay ninguna pieza o herramienta abandonada alrededor de la pieza, que pueda caer o salir despedida.

3.2.4. Requisitos a considerar durante el trabajo

1. Antes de aplicar la muela al punto de trabajo es importante dejar que gire en vacío un rato con el protector puesto, situándose el operario fuera del alcance de la muela.
2. Todas las operaciones de comprobación, ajuste, etc., deben realizarse con la máquina completamente parada, especialmente las siguientes:

- a) Sujetar o soltar piezas.
 - b) Medir o comprobar el acabado, limpiar y engrasar.
 - c) Ajustar protecciones o realizar reparaciones.
 - d) Alejarse o abandonar el puesto de trabajo.
3. Siempre que se tenga que abandonar la máquina, deberá pararse ésta, desconectando la corriente.
 4. Nunca se utilizarán las manos como freno, para parar la máquina. Aunque estén enguantadas.
 5. La presión excesiva de la muela sobre la pieza a trabajar puede ocasionar roturas y proyecciones peligrosas. Si se observa que la muela quema la pieza es señal de que la presión ejercida es demasiada.
 6. Es muy peligroso que sobre la muela parada caiga el líquido refrigerante que, absorbido en una zona de la muela, provoca su desequilibrio. Este desequilibrio puede producir la rotura de la muela cuando comienza a girar. Ante la duda es mejor cambiar de muela.

3.2.5. Protección personal

1. Trabajando con muelas abrasivas se utilizarán gafas de montura cerrada o pantallas de protección, contra impactos, homologadas.
2. Si a pesar de todo, alguna vez se le introdujera un cuerpo extraño en un ojo, no lo restriegue, puede provocarse una herida. Acuda inmediatamente al médico.
3. El operario deberá llevar ropa bien ajustada, sin desgarrones ni partes colgantes. Las mangas deben ceñirse a las muñecas o llevarse arremangadas hacia dentro.
4. Se usará calzado de seguridad que proteja contra la caída de piezas pesadas, con puntera reforzada y suelo de goma con dibujo bien marcado y sin herrajes, para evitar resbalones.
5. En las máquinas abrasivas en las que existen órganos en movimiento, no deberán usarse anillos, relojes, pulseras, etc. Como medida precautoria no deben usarse en ningún caso para trabajar.

6. Si se lleva cabello largo, es muy aconsejable recogerlo bajo un gorro o prenda similar.
7. Deben usarse además guantes de seguridad contra cortes y abrasión.

3.2.6. Orden, limpieza y conservación

1. Las máquinas herramienta deben mantenerse en buen estado de conservación, limpias y correctamente engrasadas.
2. Asimismo hay que cuidar el orden, limpieza y conservación de las herramientas, muelas, utillaje y accesorios. Tener un sitio para cada cosa.
3. Tanto las piezas en bruto, como las ya mecanizadas han de apilarse de forma segura y ordenada, o bien utilizar contenedores adecuados. si las piezas son de pequeño tamaño. No debe haber materiales apilados detrás del operario.
4. Durante el trabajo, las herramientas, calibres, cepillos, etc., han de situarse donde puedan ser alcanzados con facilidad.
5. Las herramientas deben guardarse en un armario o lugar adecuado. No debe dejarse ninguna herramienta u objeto suelto cerca de la máquina.
6. Cada cierto tiempo deben inspeccionarse y limpiarse los sistemas de ventilación de las máquinas.
7. Eliminar las basuras, trapos o cotonos empapados en aceite o grasa, que pueden arder con facilidad, echándolos en contenedores adecuados,
8. Las averías de tipo eléctrico, solamente pueden ser investigadas y reparadas por un electricista profesional; a la menor anomalía de este tipo, desconecte la máquina, ponga un cartel de "Máquina Averiada" y avise al electricista.

3.3. Criterios económicos.

3.3.1. Evaluación económica.

Para la valoración económica se considera que el material abrasivo se compra al precio referido por [14]. En su valoración económica, este autor considera los gastos en materiales, energía, transportación y mano de obra, que se invierten en la elaboración de muelas abrasivas sobre vástago. En la tabla 3.3 se pueden observar los datos utilizados en esta valoración económica.

Para la evaluación económica se tomó como referencia la mezcla preparada para el punto 3 del diseño de experimento con granulometría 54 en cantidades estequiométricas.

Para la elaboración de las muelas abrasivas sobre vástago se considera que el cemento se expende en dos tipos de moneda. Para centros educacionales, salud, y otras que paguen en CUP se expende a 25,31 CUP/ton. Para empresas mixtas el precio es de 25,31 CUP/ton y 61,71 CUC/ton. Resulta importante considerar que el cemento se valorará con el precio mayor, considerando que serán empresas mixtas las que comprarán las muelas abrasivas.

Tabla 3.3: Resumen económico de la producción de muelas abrasivas

Concepto		Consumo	Precio		Consumo (\$)
			CUC	CUP	
Materias primas	Abrasivo (Corindón y galaxita)	0,6 ton	500 CUC/ton	-	300 CUC
	Cemento Portland P-350	0,267 ton	61,71 CUC/ton	25,31	16,48 CUC 6,76 CUP
	Alambrón acero AISI 1010 Ø 6 mm	0.3333 ton	727 CUC/ton	-	242,31 CUC
Transportación		0,867 ton	4,58	19,72	17,1 CUC 3,97 CUP
Energía	Mezclado	11,76 kW-h	0,09 CUC/kW	-	1,28 CUC
	Tamizado	2,5 kW-h			
Sub total	-	-	-	-	577,17 CUC 10,73 CUP
Mano obra	10-20 % Costo producción	-	-	-	86,58 CUC 1,58 CUP
Mantenimiento y reparación	2-10 % Costo producción	-	-	-	57,72 CUC 107,3 CUP
Total	-	-	-	-	721,47 CUC 119,61 CUP

Para una tonelada preparada se pueden obtener 33333 muelas abrasivas de vástago (600 kg de abrasivo, 2667 kg de cemento y 133kg de agua), considerando que una muela pesa 30 g, sin el vástago. En cada muela se emplea un vástago de 10 g, lo que

implica el uso de 333,3 kg de acero para fabricar una tonelada de muelas (33333 unidades).

El costo de fabricación unitario de las muelas abrasivas sobre vástago es de 0,022 CUC y 0,0036 CUP, considerando que una muela abrasiva en el mercado internacional cuesta 0,50 CUC. Por lo que 33333 cuestan 16666,5 CUC. La diferencia es de 15948,05 CUC. Esto demuestra la rentabilidad económica de la producción industrial de las muelas abrasivas sobre vástago con cemento.

Como puede observarse, aproximadamente el 32 % del costo de este tipo de muela abrasivas sobre vástago lo representa el vástago metálico. Sin embargo, el abrasivo representa aproximadamente el 41 % del costo total, mientras que el cemento sólo un 2 por ciento. El 25 por ciento restante se encuentra distribuido entre la mano de obra, la transportación y el consumo energético procedentes de la elaboración de muelas abrasivas sobre vástago.

3.3.2. Valoración medioambiental.

La producción de Al_2O_3 mediante el procesamiento aluminotérmico es un proceso que en su propia esencia considera los conceptos de tecnologías limpias.

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.

La fabricación de muelas abrasivas sobre vástago con la escoria antes expuesta y cemento potencia la limpieza medioambiental, a la vez que eliminan las etapas de prensado y sinterización 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.

3.4. Alcance de los resultados.

La obtención de muelas abrasivas sobre vástago a partir de escorias del proceso aluminotérmico y cemento Portland P-3650 abre una perspectiva desarrolladora en el

estudio y la producción de nuevas alternativas de herramientas abrasivas. Dentro del futuro campo de aplicación se encuentran las muelas abrasivas sobre vástago de diferentes formas, limas de forma y, con gran interés, las muelas abrasivas cilíndricas.

3.5. Conclusiones parciales del Capítulo III

1. La relación porcentual entre las clases granulométricas de los tamaños de grano 36 y 54 es de un 70 por ciento, mientras que se comportan con una diferencia relativa de 1,7 veces. Estas diferencias alejan las clases granulométricas seleccionadas y marcan cierta representatividad en la diferenciación de su comportamiento durante la evaluación de su influencia independiente en la confección de las muelas abrasivas sobre vástago para la aplicación de desbaste.
2. Las muelas abrasivas evaluadas, correspondientes a todas las formulaciones preparadas, tanto las de grano 36, como las de grano 54, cumplieron con los requisitos exigidos por el ensayo de rigidez al soportar más de 5 min de trabajo a velocidades angulares de 30000 rpm, sin mostrar señales de agrietamiento, ni de vibraciones en la unión entre el vástago y la muela abrasiva.
3. El punto 3, correspondiente a una muela abrasiva elaborada con grano No 36 (55 % de escoria y 45 % de mezcla de A/C), se corresponde con un desgaste relativo similar al de la muela abrasiva patrón (0,7 %). No obstante, existen otras mezclas (3 y 4, grano No 36 y 4, grano No 54), cuyos desgastes relativos son inferiores (mejor comportamiento), que la muela abrasiva patrón.
4. De una tonelada de materias primas (600 kg de abrasivo, 266,6 kg de cemento y 133,4 de agua) se pueden obtener 33333 muelas abrasivas de vástago, con 333,3 kg de acero para la colocación de los vástagos.
5. El costo de fabricación unitario de las muelas abrasivas sobre vástago es de 0,022 CUC y 0,0036 CUP. Una muela abrasiva en el mercado internacional cuesta 0,50 CUC. La ganancia de la producción de una tonelada de muelas abrasivas sobre vástago, a partir de escoria y cemento Portland P-350, es de 15948,05 CUC.

CONCLUSIONES GENERALES

1. El trabajo constituye un aporte al desarrollo de las herramientas abrasivas cubanas, al proponer una metodología para la obtención de muelas abrasivas sobre vástago, a partir de escorias (corindón y galaxita) y una mezcla de cemento Portland P-350 y agua.
2. El trabajo apoya el programa de reducción del consumo energético en Cuba, al proponer eliminar los procesos de prensado y sinterización, comúnmente aplicados durante la obtención de muelas abrasivas de vástago, mediante la sustitución de aglutinantes que requieren altas temperaturas de secado por otros de endurecimiento a temperatura ambiente (cemento).
3. Durante la producción de las muelas abrasivas sobre vástago, aproximadamente el 32 % de su costo lo representa el vástago metálico. Sin embargo, el abrasivo representa aproximadamente el 41 % del costo total, mientras que el cemento sólo un 2 por ciento. El 25 por ciento restante se encuentra distribuido entre la mano de obra, la transportación y el consumo energético en la elaboración de muelas abrasivas sobre vástago.
4. La muela elaborada, a partir de una mezcla con 60 % escorias, 26,66 % cemento y 13,34 % de agua destilada, presenta un comportamiento similar a las muelas abrasivas comerciales fabricadas por la firma NORTON. Su costo de producción unitario es de 0,022 CUC y 0,0036 CUP. Una muela abrasiva similar en el mercado internacional cuesta 0,50 CUC, lo que representa una ganancia unitaria de 0,48 CUC.

RECOMENDACIONES

1. Investigar el efecto de la influencia de la calidad del cemento (tipo de cemento), la relación agua cemento y el tiempo de curado en la rigidez y eficiencia de trabajo (índice de desgaste relativo) de las muelas abrasivas sobre vástago.
2. Investigar el comportamiento de las muelas abrasivas para el desbaste de otros tipos de materiales.
3. Diseñar moldes semindustriales para la obtención de muelas de forma con vástago.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] La granulometría. 2000 [cited; Available from: \La Granulometría.htm.
- [2] Materiales abrasivos. 2004 [cited; Available from: www.cielosur.com, 2004. .
- [3] in NC 19 – 02 – 16 1983.:, Sistema de Normas de Protección e Higiene , República de Cuba .
- [4] corindon, in Encarta 2000. 2002, 2002.
- [5] Carrazana, O.B., Manual de Rectificadora, ed. E.P.y. Educación, Cuba.
- [6] Mecanizado con abrasivos.2005 [cited; Available from:
<http://produccion.cps.unizar.es>.
- [7] Torjan, R.F.y.P., Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones, ed. E.M.G. Hill. 1979.
- [8] Cemento Portland.Espesificaciones., in NC 95-2001. 2001: Cuba.
- [9] Comité Tecnico Para El Uso de Aditivos. 20004: España.
- [10] Importancia del Agua de Amasado en la Calidad de Hormigones y Morteros: Cuba.
- [11] RESISTENCIA AL DESGASTE. [cited; Available from:
<http://www.arqhys.com/permeabilidad-concreto.htm>.
- [12] ENSAYO Y EMPLEO DE MATERIALES [cited; Available from:
<http://www.fao.org/docrep/003/V9468S/v9468s07.htm>]. .
- [13] UNCETA, c.f., Catálogo de Precios Para Heramientas de Calidad. tercera ed. 1994, España 251-252.
- [14] Padrón, Y.G., Obtención de materiales abrasivos a partir del procesamiento aluminotérmico 2006, UCLV: Cuba. p. 38-39.
- [15] Hernández Ortega, T. Obtención, a partir de materias primas cubanas y por reducción aluminotérmica, de un ferromanganeso de bajo contenido de carbono y con más de 65% de manganeso. Trabajo de diploma. Facultad de Química Farmacia, UCLV. 2004.
- [16] Vyslovzi, Zdene et al. Ciencia de materiales para ramas de metales. Ed. Ciencia y Técnica 1971 pag 179.

- [17] Rodríguez Esquivel, J. Elaboración de muelas abrasivas a partir de residuales del proceso de reducción alumniotérmica. Trabajo de diploma. Facultad de Ingeniería Mecánica, UCLV. 2004.
- [18] Ortelio Boada Carrazana, Yury Sviavolsky: Teoría del Corte de Metales T II, Editorial Pueblo y Educación 1985.
- [19] <http://www.fandeli.com.mx/content/info/es/informacion.asp>
- [20] www.cielosur.com. : Los abrasivos. Mayo 27 del 2004.
- [21] <http://www.segemar.gov.ar/NuevoProducto/>. Servicio Geológico Minero Argentino.
- [22] <http://www.uned.es/cristamine/fichas/corindon/corindon.htm>/Enciclopedia Encarta 2000.
- [23] <http://www.fepa-abrasive.org/>
- [24] <http://www.panabrasive.com/SpanishPanAbrasive/aplicaciones>
- [25] <http://produccion.cps.unizar.es/mecanizado/con/abrasivos>.
- [26] <http://www.samyangab.co.kr/> SAM YANG ABRASIVES CO., LTD
- [27] <http://www.abrasives.ru/> Ceramic Bond Abrasive Tools.
- [28] F. Skaupy: Cerámica de los metales — Editorial Reverté Edición 1972
- [29] Van Vlack: Materiales para Ingeniería — Editorial CECSA Edición 1984
- [30] Catálogo de Abrasivos, Editorial MIR, Moscú, 1985.
- [31] Norma Cubana NC 57-25 Herramientas Abrasivas, de 1983.

ANEXOS