

129
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO, DESARROLLO Y APLICACIONES DE
LOS ABRASIVOS EN LA INDUSTRIA NACIONAL

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

p r e s e n t a n

JOSE ANTONIO TORRES ANGLADA
MANUEL ANTONIO VAZQUEZ CAMARENA



Director de Tesis:

ING. SARA CERRUD SANCHEZ

México, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

<i>Capítulo 1</i>	Introducción	1
<i>Capítulo 2</i>	Abrasivos sintéticos (convencionales)	3
<i>Capítulo 3</i>	Abrasivos no convencionales (Diamante y nitruro de boro cúbico)	16
<i>Capítulo 4</i>	Aglutinantes	35
<i>Capítulo 5</i>	Características de las ruedas abrasivas	50
<i>Capítulo 6</i>	Proceso de fabricación de ruedas abrasivas	57
<i>Capítulo 7</i>	Usos y aplicaciones de las ruedas abrasivas	70
<i>Capítulo 8</i>	Situación actual de la industria de los abrasivos en México	78
<i>Capítulo 9</i>	Conclusiones	81
	Bibliografía	83

Capítulo I

INTRODUCCION

Desde que el hombre descubrió que al tallar dos materiales distintos para darle forma a uno de ellos, el uso de los abrasivos se ha extendido notablemente a casi todos los campos de la actividad industrial.

Ahora bien, definimos como un abrasivo a cualquier material que friccionado contra otro, realice un deterioro en su superficie, desde un simple rayado hasta un arranque de material. Esto nos dice que cualquier material puede ser considerado como abrasivo siempre y cuando cumpla con lo anterior.

Actualmente, la mayor parte de los materiales existentes como metales, maderas, cerámicos, hules y plásticos, se les ha sometido a algún proceso donde intervenga el uso de abrasivos. Por ello, la industria de los abrasivos es muy solicitada y en consecuencia, su importancia crece día con día.

Partiendo de lo anterior, veremos que muchos materiales se han estudiado para darles uso como abrasivos, sin embargo, deberán cumplir con características particulares para que sean utilizados con éxito. Este estudio se enfoca sobre la práctica común, ya que en lo sucesivo se expondrá que cada proceso que emplea abrasivos es un caso particular en el que no existen reglas o métodos formales para el uso de un abrasivo específico sobre una cierta aplicación.

El acelerado progreso industrial que se vive actualmente, ha propiciado un amplio desarrollo en todas sus ramas. Las exi-

gencias de mejores productos obligan a una calidad tal, que hasta hace unos cuantos años era muy difícil lograrla.

Sectores tales como el siderúrgico o el automotriz, se han convertido en indicadores importantes que en un determinado momento pueden servir para evaluar el nivel de desarrollo tecnológico con que cuenta un país. Siendo la industria de los abrasivos indispensable para estos sectores, ha tenido que avanzar paralelamente a ellos para satisfacer sus demandas.

Este trabajo está enfocado hacia las ruedas abrasivas debido a que estos productos son los de mayor aplicación industrial y los más representativos del avance tecnológico en los abrasivos.

Dentro de la fabricación de ruedas se pueden distinguir dos tipos: convencionales y superabrasivas. Las primeras son fabricadas con abrasivos tales como el carburo de silicio y el óxido de aluminio, considerados como los más comunes; las segundas son fabricadas con el diamante y CBN, considerados como superabrasivos, debido a su alta dureza y sus elevadas temperaturas de fusión.

En resumen, este trabajo pretende ofrecer un panorama generalizado de lo que significan los abrasivos para la industria presentando los usos más comunes así como las necesidades que éstos deberán cubrir atendiendo al avance tecnológico de las industrias consumidoras de abrasivos y, por último, se muestra el papel que desempeñan los abrasivos dentro de la industria nacional.

Capítulo 2

ABRASIVOS SINTETICOS

Los abrasivos sintéticos más conocidos son:

- I. Carburos
- II. Boruros
- III. Silicios
- IV. Oxidos
- V. Silicatos

I. Carburos

En general, tanto los carburos metálicos como los no metálicos son sustancias duras, usualmente más duras, tanto del metal como del no metal del cual provienen. Esto es debido a

TABLA 2.1. PROPIEDADES DE ALGUNOS CARBUROS

Carburo	Dureza kg/mm ²	P. de fusión °C	Calor de formación		Densidad g/cm ³
			kcal/mol	kcal/cm ³	
Al ₄ C ₃			-31.00	-0.65	2.99
B ₄ C	2800	2450	-13.80	-0.63	2.50
Be ₂ C		3880			12.20
Mo ₂ C	1800	2690	-4.20	-0.12	5.90
NbC	2470	3500	-30.00	-2.25	7.82
SiC	2500	2400	-1.43	-0.115	3.20
Ta ₂ C		3400	-36.00	-2.85	
TaC	1800	3880	-38.50	-2.85	14.30
TiC	3200	3140	-43.80	-3.10	4.25
VC	2800	2830	-28.00	-2.50	5.36
V ₂ C	3000	2860	-13.00		
WC	2400	2870	-8.40	-0.74	17.20
ZrC	2600	3530	-45.00	-2.93	6.70
Fe ₃ C	700		-5.00	-0.231	7.67

Coes, L. Jr: Abrasives (1971), p.115

que el carbón tiende a enlazarse con los electrones libres de tal forma que los materiales llegan a ser duros, frágiles y pierden su ductilidad.

En la tabla 2.1 se puede observar que en este grupo de carburos están representadas sustancias que tienen mayor dureza y mayor punto de fusión que cualquier abrasivo comercial, pero ninguno en la tabla con excepción del carburo de silicio, ha sido utilizado con éxito como abrasivo.

Esto puede verse en la tabla 2.2, donde aparecen en orden los abrasivos de mayor comercialización, ocupando la segunda posición el carburo de silicio.

TABLA 2.2. ABRASIVOS MAS COMUNES

Abrasivo	Dureza Knoop (kg/mm ²)	Costo por libra (US Dts)
Oxido de aluminio	2100	\$ 0.25
Carburo de silicio	2480	0.35
Alumina-Zirconia	1800	0.60
Diamante	7000	2500.00
Nitruro de boro cúbico (CBN)	4700	2500.00

The Grinding Wheel (1967), p.36

El carburo de boro fue introducido como un producto comercial en los años 30's y gozó por varios años, de una reputación como la sustancia sintética más dura disponible comercialmente. El uso más empleado lo tiene en las toberas lanza-arena (sand blast). Estas aplicaciones consisten en generar un choque del grano abrasivo contra la superficie del material a velocidades elevadas.

Por otra parte, las ruedas que lo contienen como abrasivo, se caracterizan por su gran capacidad de remoción.

Para explicar el lugar que ocupa el carburo de boro al actuar como abrasivo en relación a otros, se realizaron ensayos empleando el aparato que se muestra en la figura 2.1:

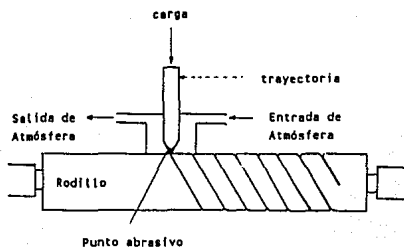


FIGURA 2.1. Aparato para el estudio de las propiedades de uso en los abrasivos.

Ueltz, H.F.G.; The Boron Carbide Question. 3rd Ann. Rept. Abras. Assoc., Carnegie-Mellon Univ. (april 1968).

Coes, L. Jr: Abrasivos (1971), p.116

Este aparato se constituye de un rodillo cilíndrico de acero correctamente pulido y sobre éste se coloca una punta cónica del material abrasivo que ejercerá una carga fija sobre la superficie del rodillo. El ensayo consiste en generar una trayectoria mediante un movimiento rotatorio del rodillo y un movimiento rectilíneo de la punta abrasiva como se muestra en la figura. La punta raya la superficie del rodillo una cierta longitud hasta que falla perdiendo sus propiedades abrasivas.

En el rodillo de acero se encontró que la longitud del rayado decreció con el cambio del abrasivo en el siguiente orden: óxido de aluminio - carburo de silicio - carburo de boro.

Por otro lado, en rodillos de vidrio, el orden fue: Carburo de silicio - óxido de aluminio - carburo de boro.

Otra evidencia mostró que la longitud de rayado fue más corta para todos los abrasivos en aire húmedo que en aire seco. Se demostró, además, que en una atmósfera de hidrógeno la trayectoria del rayado del acero fue más larga en todos los casos pero el efecto se pronunció principalmente en el caso de los carburos. La alúmina, sin embargo, produjo todavía la rayadura más larga. En los rodamientos de vidrio, los efectos del hidrógeno se pronunciaron en mayor medida para el caso de los carburos, disminuyéndose en el óxido de aluminio.

Las conclusiones son:

1) Los carburos reaccionan directamente con el hierro y son, además, oxidados por el oxígeno contenido en el aire. La reacción es acelerada por la introducción de vapor de agua.

- 2) El carburo de boro reacciona con el vidrio.
- 3) El óxido de aluminio reacciona con el acero. La reacción es lenta y se acelera por la presencia de oxígeno y agua.
- 4) El óxido de aluminio reacciona rápidamente con el vidrio.

El carburo de boro aparece como un material altamente reactivo en lo que se refiere a la oxidación, o bien con el contacto con una amplia variedad de superficies frescas.

El carburo de boro muestra un rendimiento abrasivo bajo después de un alto rendimiento inicial; éste último se debe por una parte a la fractura y, por otra, al agotamiento químico.

El fenómeno observado puede atribuirse al efecto lubricante que presenta la película de ácido bórico producida al inicio del rayado.

Resultados en el carburo de titanio (TiC) y el carburo de circonio (ZrC) muestran el mismo tipo de comportamiento en metales ferrosos como lo hacen el carburo de silicio (SiC) y el carburo de boro (B_4C), aunque no han sido estudiados a gran detalle. El resto de los carburos han recibido poca atención porque se asume que éstos sufrirían de las mismas deficiencias.

En la tabla 2.1 se presenta el valor calculado del calor de formación por unidad de volumen. Esta puede ser tomada como una burda medida de la estabilidad de estas sustancias en el caso del proceso de esmerilado.

II. Boro y Boruros

El boro elemental es una sustancia dura similar en propiedades físicas y en comportamiento abrasivo al carburo de boro. No ha mostrado la promesa de llegar a ser utilizable en este campo. Se encuentra compuesto con los metales mostrados en la tabla 2.3.

TABLA 2.3. BORUROS METALICOS

Boruro	Dureza kg/cm ²	Calor de formación kcal/mol	Punto de Fusión °C
B	2500	0	2050
CrB ₂	1800	-30	2100
AlB ₁₂			
HfB ₂			3060
MoB	2350		2180
Mo ₂ B	2500		2100
NbB			2000
NbB ₂	2600		2500
TaB ₂	2615	-52	3100
TaB ₄		-52	2500
TaB ₆		-66	2100
TiB ₂	3400	-72	2920
YB ₂	2100-2800		2100
Va	2600	-12	2920
ZrB ₂	2300		2990

Coes, L. Jr: Abrasivos (1971), p.117

De la tabla puede observarse que los boruros en general son algo más suaves y con más bajo punto de fusión que sus correspondientes carburos. Puede observarse también que éstos,

al igual que los carburos tienen un bajo calor de formación y son potencialmente inestables con respecto a la oxidación. Tal trabajo experimental indica las mismas deficiencias presentes en los carburos.

El boruro de titanio, el cual es uno de los más prometedores en cuanto a sus propiedades, estabilidad y costo, ha recibido mayor atención debido a que se ha encontrado una aplicación práctica en componentes de dados de carburo y en el esmerilado de vidrio. Por otro lado, muestra un pobre funcionamiento en el acero. No se utiliza comercialmente como abrasivo pero ha captado interés en otros campos porque tiene una alta conductividad térmica.

Nitruros

Los nitruros de algunos metales son también, sustancias que poseen alta dureza y así como un alto punto de fusión.

En la tabla 2.4 se muestran algunos nitruros metálicos:

TABLA 2.4 NITRUROS METALICOS

Nitruro	Dureza Mohs	Punto de fusión °C
NiN	8 - 9	3310
TaN	8 - 9	2980
TiN	8 - 9	2950
Zn	8 - 9	2980

Cox, L. Jr: Abrasivos (1971), p.118

Los nitruros son menos conocidos que los carburos y los boruros, y son difíciles de preparar en forma adecuada para abrasivos. Además, los nitruros tienen un bajo calor de formación y se presume que mostrarían un comportamiento abrasivo similar al de los carburos y boruros.

III. Silicios

Los silicios metálicos en general, son poco conocidos y las propiedades tales como la dureza y punto de fusión se han recopilado sistemáticamente, indicando que estos compuestos son más suaves y de menor punto de fusión que los carburos y los boruros correspondientes. Por tal motivo, los silicios no tienen valor para propósitos abrasivos.

IV. Oxidos

Los óxidos son las sustancias más preciadas en la industria de abrasivos. Actualmente sólo tres óxidos son utilizados comercialmente: óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de circonio (ZrO_2) y óxido de silicio (SiO_2). Aunados a éstos, otros óxidos son utilizados en pulido: óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de cesio (CeO_2) y óxido de estaño (SnO_2). Como grupo, estos últimos son más suaves y con menor punto de fusión que los carburos y boruros correspondientes, pero tienen la propiedad de una gran estabilidad química, particularmente, contra la oxidación. En la tabla 2.5 están listados los óxidos con mayor punto de fusión y sus propiedades.

TABLA 2.5 ÓXIDOS REFRACTARIOS

Oxido	Dureza kg/mm ²	Punto de fusión °C	Densidad g/cm ³	Calor de formación kcal/mol kcal/cm ³	
Al ₂ O ₃	2050	2040	4.00	-399	-15.70
BeO	(9)*	2550	3.02	-146	-17.60
CeO ₂	(6)*	2600	5.23	-233	-7.08
Cr ₂ O ₃		2265	5.21	-267	-9.28
HfO ₂		2815	9.68	-271	-12.50
Fe ₂ O ₃		1565	5.12	-196	-6.26
LaO ₃			6.51	-458	-9.20
MgO	1100	2800	3.65	-145	-13.00
Nd ₂ O ₃			7.44	-442	-9.54
Nb ₂ O ₄	1780		4.60	-388	-6.74
Pr ₂ O ₃			6.87	-444	9.27
SiO ₂	820	1728	2.65	-205	9.06
Ta ₂ O ₅		1470	8.73	-500	-9.90
ThO ₂	(6.5)*	3300	4.64	-292	-5.30
SnO ₂		1120	7.00	-138	-6.45
TiO ₂	(6)*	1840	4.26	-218	-11.60
ZrO ₂	1200	2700	5.73	-258	12.05

* Escala Mohs.

Coes, L. Jr: Abrasivos (1971), p.119

Es muy importante hacer notar de la tabla 2.5 que los óxidos teniendo un calor de formación más grande de 10 kcal/cm³, y que no son reducidos por su propio metal, son los únicos que poseen un valor abrasivo. Estos son: óxido de aluminio (Al₂O₃), óxido de berilio (BeO), óxido de hafnio (HfO₂), óxido de magnesio (MgO) y óxido de circonio (ZrO₂). De esta lista, el óxido de berilio (BeO), se asume que posee un valor abrasivo pero no ha sido adecuadamente probado a causa de su toxicidad. El óxido de magnesio (MgO) es conocido por

ser un buen abrasivo, pero no es utilizado comercialmente porque presenta problemas en cuanto a su resistencia al agua y su conductividad térmica. El óxido de hafnio (HfO_2) no es utilizado debido a su alto costo, pero es un constituyente del óxido de circonio (ZrO_2) comercial.

Ningún óxido teniendo un calor de formación menor de 10 kcal/cm³ ha sido empleado como abrasivo, excepto el óxido de silicio (SiO_2), el cual es ampliamente usado por su bajo costo de obtención.

De los óxidos dados en la tabla 2.5, los que son hechos sintéticamente para propósitos de abrasivo son: óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y óxido de circonio (ZrO_2).

El óxido de hierro, en la forma de colorete u hojuelas es usado sólo para propósitos de pulido. Es fabricado comercialmente por la calcinación del sulfato de hierro en crisoles. La masa que permanece después de la calcinación es roja en el fondo y violeta en la superficie. La parte oscura (el material violeta) es separado como hojuelas y la parte brillante (el material rojo) en el fondo es vendido como colorete.

La circonia, como abrasivo, tiene uso sólo en materiales de aleación de óxido de aluminio. Las fuentes de circonia son el óxido, baddelyite, el silicato y el circón. Este último constituye la fuente más usual. Del circón, el ZrO_2 puede ser hecho en un horno de fusión por arco de la misma manera que la alúmina es preparada de la bauxita; la sílica viene siendo reducida por el hierro. En este caso, sin embargo, a

causa de la alta temperatura de fusión, es práctico volatilizar el SiO_2 y no usar del todo hierro. Fusiones de ZrO_2 , de las cuales todo el SiO_2 ha sido removido, desintegramo la masa en granos finos o en polvo debido a la fase de transformación de las altas temperaturas de estructura cúbica, a la baja temperatura de la forma monoclinica. La desintegración no es tan completa en presencia del 1 al 2% de óxido de silicio (SiO_2); el óxido de circonio (ZrO_2) puede ser estabilizado en forma cúbica por adición de óxido de calcio (CaO), y tal estabilización de la circonia es importante en la industria de los refractarios. Actualmente ninguna circonia estabilizada con estos óxidos es usada en el campo de los abrasivos.

Los óxidos mezclados incluyendo componentes, compuestos y soluciones sólidas tienen poco interés como abrasivos. Estos contienen alúmina. Otros sistemas que tienen posibilidades como abrasivos son los circonates, particularmente son de bario y estroncio, tienen altos puntos de fusión de 2700 y 2750 °C, y deberán calificarse como abrasivos con estas bases. Sin embargo, los puntos de fusión son escasamente más altos que la circonia misma y ambos parecen ser más suaves que el óxido de circonio (ZrO_2). Estas sustancias han sido poco investigadas excepto para usos refractarios.

V. Silicatos

Muchos silicatos son conocidos: tienen una dureza en la escala de Mohs de 8 o más. Son varios los que existen en forma natural, y han sido probados por sus cualidades abrasivas; aunque ninguno ha tenido valor para el esmerilado de metales

ferrosos. Algunos silicatos están mezclados incongruentemente o en descomposición. Se presume que todos se formaron al natural bajo condiciones de alta presión, y ha sido posible sinterizar dichos silicatos con altas presiones y temperaturas y en varios casos, determinar sus áreas de estabilidad.

Un estudio intensivo fue realizado bajo los mismos rangos de temperatura y presión para desarrollar nuevos silicatos que pudieran ser de mayor calidad abrasiva; pero ninguno tuvo éxito. En la tabla 2.6 están listados los minerales estudiados y las condiciones óptimas encontradas necesariamente para esta síntesis.

TABLA 2.6 SILICATOS SINTETICOS

Míneral	Fórmula	Presión (atm)	Temperatura °C
Andradite	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	20,000	900
Grossularite	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	20,000	900
Pyrope	$\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	30,000	900
Spessartite	$\text{Mn}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	10,000	900
Almandite	$\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	10,000	900
Sillimanite	Al_2SiO_5	10,000	700
Andalusite	Al_2SiO_5	10,000	700
Kyanite	Al_2SiO_5	20,000	900
Topaz	$\text{Al}_2\text{SiO}_4\text{F}_2$	20,000	900
Jadeite	$\text{NaAl}(\text{SiO}_3)_2$	20,000	900
Epidote	$\text{Ca}_2(\text{FeOH})\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	10,000	800
Zoisite	$\text{Ca}_2(\text{AlOH})\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	10,000	800
Lawsonite	$\text{H}_4\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$	10,000	700
Staurolite	$\text{HFeAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{13}$	10,000	800
Bertrandite	$\text{H}_2\text{Be}_4\text{Si}_2\text{O}_9$	20,000	800

Coes, L. Jr: Abrasives (1971), p.120

Ninguno de éstos tuvieron las propiedades que indicaran una superioridad sobre el granate natural comercial. Además, las condiciones necesarias para la síntesis de estos materiales se aproximaron a las del diamante. Su costo de manufactura, por tanto, está fuera de proporción al valor de los abrasivos comerciales.

Abrasivos naturales

Existen varios minerales naturales que han sido utilizados con fines abrasivos. Algunos de ellos son:

- Cuarzo: usado para el afilado de cuchillos y algunas herramientas de corte y para pulido con chorro de arena.

- Granate: tiene los mismos usos que el cuarzo pero posee mejores propiedades abrasivas y se emplea sobre todo para el pulido de maderas.

- Trípoli: se emplea en el pulido de metales suaves tales como el aluminio.

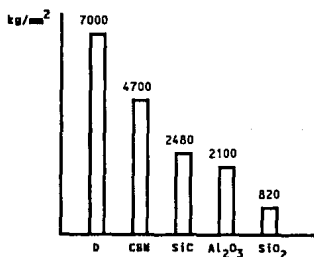
- Piedra pómez: en forma de polvo se utiliza para el pulido de metales.

Gracias al avance tecnológico, en la actualidad es posible obtener abrasivos sintéticos con las mismas o mejores propiedades que los naturales a un costo menor. Esto ha propiciado que los minerales abrasivos que se extraen directamente de la naturaleza representen una mínima parte del total consumido por la industria.

Capítulo 3

ABRASIVOS NO CONVENCIONALES Diamante y Nitruro de Boro Cúbico

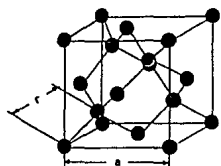
El diamante y el Nitruro de Boro Cúbico (CBN) se utilizan como abrasivos debido a su alta resistencia y dureza. El primero es el material de mayor dureza que se conoce, seguido por el CBN (figura 3.1).



ABRASIVO	Diamante	CBN
DENSIDAD (g/cm ³)	3.52	3.48
ESTABILIDAD TÉRMICA (Aire)	700°C	1400°C
COMPORTAMIENTO QUÍMICO	Afinidad con aceros de bajo carbono; oxida en aire	Ninguna afinidad con aceros de bajo carbono; reacciona con vapor de agua desde 1000°C

FIGURA 3.1. Dureza y propiedades físico-químicas del diamante (D) y carburo de boro cúbico (CBN)
Chrenko, R.M., Strong, H.M.(1979) Physical properties of diamond, p.24-31.

La resistencia y dureza, propiedades tan valiosas para el maquinado, son consecuencia directa de una estructura cristalográfica particular y común entre el diamante y el CBN, que resulta de fuertes enlaces covalentes tetraédricos entre los átomos vecinos dentro del cristal. Ambos pueden originarse de sus equivalentes hexagonales dotados con características físicas totalmente diferentes, y generalmente conocidos como grafito y grafito blanco, respectivamente.



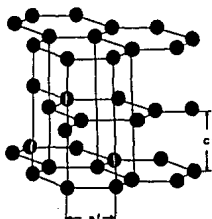
Forma cúbica (abrasivo)

Diamante

3.52 g/cm^3

$r = 1.54 \text{ \AA}$

$a = 3.56 \text{ \AA}$



Forma hexagonal (lubricante)

Grafito

2.25 g/cm^3

$c' = 3.35 \text{ \AA}$

$a' = 1.42 \text{ \AA}$

FIGURA 3.2 Estructura cristalográfica de diamante y grafito.

El Carbono: Grafito-Diamante

El diamante y el grafito son las dos principales formas alotrópicas del carbono, las cuales difieren solamente en la estructura de enlace entre los átomos del mismo carbono.

Como se observa en la figura 3.2, el grafito se caracteriza por una estructura laminar [O'Donovan, 1975] con fuertes enlaces covalentes entre dos átomos idénticos de carbono contenidos en los planos hexagonales con un parámetro de red a' entre carbono y carbono. Entre dos planos hexagonales, la unión es mucho más débil, con una distancia interplanar c' , así que el desplazamiento de un plano con respecto a otro, requiere de un esfuerzo mínimo.

La estructura de los planos característica del grafito explica su utilización como lubricante.

La diferencia en la resistencia de un enlace dentro de un plano y entre dos planos se debe a las correspondientes diferencias en longitud del enlace. Mientras en el grafito cada átomo de carbono tiene tres compañeros principales dentro del propio plano, el diamante tiene un enlace tetraédrico con cada carbono al centro de un tetraedro formado por sus cuatro vecinos más cercanos (figura 3.2). Este cuádruple enlace y el alto grado simétrico explica la marcada resistencia y dureza en la red del diamante. La única fragilidad descansa sobre los planos octaédricos, donde un cristal de diamante puede ser cortado con relativa facilidad.

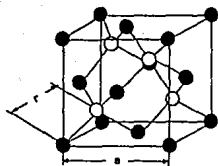
La distancia interatómica r es ligeramente mayor que la distancia a' , medida dentro de una celda hexagonal en el grafito, y mucho menor que la separación c' entre dos planos de éste. De aquí la gran diferencia que existe entre las densidades del diamante y del grafito.

Los tetraedros con un átomo de carbono en el centro y cuatro átomos de carbono en las esquinas pueden considerarse como una estructura cúbica centrada en las caras, lo cual explica por qué el diamante sintético y el natural se presentan frecuentemente como cristales en formas de octaedro, cúbicos o cúbico-octaedro, fácilmente identificables.

Carburo de Boro Cúbico y Hexagonal: Boro y Nitrógeno

Las explicaciones anotadas para el diamante y el grafito se aplican al CBN si se reemplaza a los átomos de carbono con boro, y átomos de nitrógeno como los vecinos más cercanos. El nitrógeno y el boro forman un compuesto covalente, nitruro de boro con dos formas alotrópicas: la forma hexagonal (mejor conocida como grafito blanco) y la forma cúbica (nitruro de boro cúbico) o CBN.

El hecho de que el grafito blanco es un agente lubricante, por un lado, y que el CBN ha llegado a ser un abrasivo ampliamente utilizado, por el otro, es una consecuencia directa de las sorprendentes diferencias en las estructuras cristalográficas (figura 3.3).



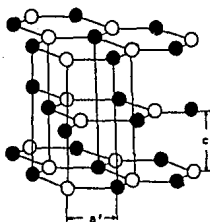
Forma cúbica (abrasivo)

CBN

3.48 g/cm^3

$r = 1.57 \text{ \AA}$

$a = 3.61 \text{ \AA}$



Forma hexagonal (lubricante)

HBN

2.25 g/cm^3

$c' = 3.33 \text{ \AA}$

$a' = 1.45 \text{ \AA}$

FIGURA 3.3 Estructura cristalográfica de nitruro de boro cúbico (CBN) y nitruro de boro hexagonal (HBN). Los círculos en negro representan los átomos de boro, mientras los círculos en blanco representan los átomos de nitrógeno.

A causa de que el enlace covalente entre los átomos de nitrógeno y boro es heteropolar, la dureza y la densidad del CBN son menores que en el caso perfectamente simétrico homopolar, ejemplificado por el diamante donde sólo aparecen átomos de carbono. El paralelismo casi perfecto sólo mantiene las propiedades físicas y mecánicas y es anulado si la naturaleza química del abrasivo es compleja.

Otra diferencia notable concierne a la disponibilidad de las diversas formas alotrópicas. Mientras el diamante aparece en forma natural y ha sido utilizado por el hombre durante siglos, el nitruro de boro aparece como un producto sintético y nunca se encuentra en forma natural; el CBN existe en forma combinada en una extensa lista de materiales puramente sintéticos.

Síntesis del Diamante

La transformación grafito-diamante

El diamante fue conocido a principios de 1797 como una forma de carbón.

Puesto que la densidad del diamante es mayor (3.52 g/cm^3) que la del grafito (2.5 g/cm^3), fue comprobado que ejerciendo altas presiones sobre una muestra de grafito, puede forzarse a los átomos de carbono de la forma hexagonal a un reacomodo de los mismos y convertirse en diamante.

Para el diagrama de fase del carbón (figura 3.4), el grafito es la forma termodinámica estable del carbón a temperaturas y presiones normales, mientras que el diamante constituye la forma metaestable para dichas condiciones.

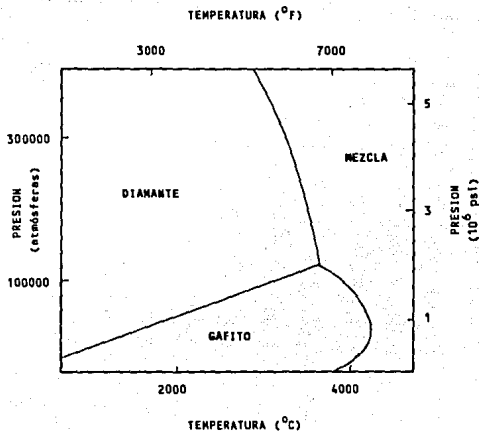


FIGURA 3.4 Diagrama temperatura-presión para el carbón. El diagrama muestra las regiones correspondientes de la estabilidad termodinámica de diamante y grafito.

Nassau, K. and Nassau, J. (1978): The history and present status of synthetic diamond. Part I and Part II, p. 76-96, 490-508.

Dentro de la región termodinámica estable del diamante, en condiciones de 300,000 atmósferas y 1000°C , dicho límite de energía inhibe la cristalización directa del diamante a grafito. En el proceso de síntesis, descubierto en 1950 por equipos de científicos que trabajan para la General Electric's Research Laboratory, un solvente metálico es utilizado reduciendo las proporciones manejables de la energía de activación necesarias para la transformación grafito-diamante.

Cuando el metal es calentado bajo presión, éste disuelve el grafito hasta que la solución del metal líquido llega a estar supersaturada de grafito, y se puede obtener una precipitación como diamante.

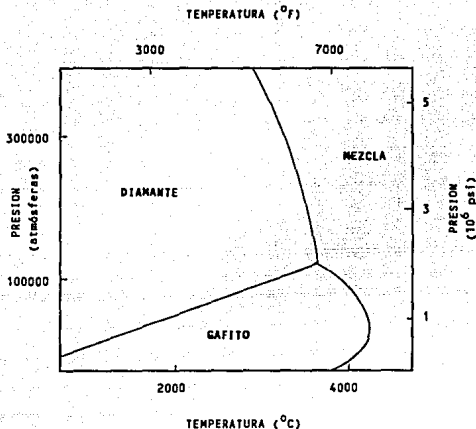


FIGURA 3.4 Diagrama temperatura-presión para el carbón. El diagrama muestra las regiones correspondientes de la estabilidad termodinámica de diamante y grafito.

Nassau, K. and Nassau, J. (1978): The history and present status of synthetic diamond. Part I and Part II, p. 76-96, 490-508.

Dentro de la región termodinámica estable del diamante, en condiciones de 300,000 atmósferas y 1000°C, dicho límite de energía inhibe la cristalización directa del diamante a grafito. En el proceso de síntesis, descubierto en 1950 por equipos de científicos que trabajan para la General Electric's Research Laboratory, un solvente metálico es utilizado reduciendo las proporciones manejables de la energía de activación necesarias para la transformación grafito-diamante.

Cuando el metal es calentado bajo presión, éste disuelve el grafito hasta que la solución del metal líquido llega a estar supersaturada de grafito, y se puede obtener una precipitación como diamante.

A nivel atómico pueden encontrarse diferencias despreciables entre el diamante natural y el sintético; diferencias en la cantidad y la naturaleza de las impurezas o inclusiones, así como en el patrón de crecimiento del cristal y en la friabilidad*. El diamante natural debe ser utilizado como se obtiene de las minas, con poca o ninguna posibilidad de influenciar la friabilidad de los gránulos. Debido a la gran variedad de solventes metálicos disponible y al amplio rango de opciones de presión y temperatura, es posible manejar la nucleación y el subsecuente crecimiento de los cristales de diamante y obtener una multitud de granos con características específicas.

El concepto de friabilidad es de primordial importancia para la operación de la rueda abrasiva de diamante. Cualquier diamante, a pesar de su forma o tamaño, tiene la misma dureza, sea sintético o natural. La friabilidad o la tendencia del grano a fracturarse en pequeños fragmentos bajo una carga, es una función de la forma, íntegra y puramente del cristal, propiedades que son por ellas mismas, una consecuencia del modelo de crecimiento durante la síntesis. Es gracias a su ajustable fragilidad y friabilidad que el diamante sintético ha desplazado en varias aplicaciones de uso industrial al diamante natural. De aquí, la multiplicidad de tipos de granos disponibles hoy para la manufactura de ruedas abrasivas y otras aplicaciones.

*Aunque no existe formalmente una traducción de la palabra "friability", los principales fabricantes de abrasivos en México aceptan el término "friabilidad".

Sensibilidad Térmica del Diamante e Interacciones con Materiales Ferrosos

Aún cuando el diamante y el CBN son utilizados como abrasivos, debido a su gran dureza sobre los otros materiales conocidos, están expuestos a una atmósfera físico-química compleja durante la interfase de esmerilado, a variados fenómenos de desgaste. En el proceso de esmerilado, los granos de abrasivo están sujetos a altas temperaturas y tensiones de impacto generadas por cada paso de la rueda abrasiva sobre la pieza de trabajo.

El diamante, a pesar de su gran dureza y resistencia al desgaste, está lejos de ser indestructible. Esto es el resultado de propiedades térmicas muy particulares, una alta conductividad térmica, dos a seis veces mayor que el cobre y muy bajo coeficiente de expansión térmica. A diferencia de los metales, donde el calor es transferido vía electrones libres arrastrados a través de la red cristalina, el calor conducido por el diamante puede servir como un medio para los fonones*, pequeños paquetes o cantidad elemental de energía o energía vibracional; la transferencia de fonon es extremadamente eficiente debido a su baja masa de átomos de carbono y la alta energía de enlace. Además, el diamante tiende a convertirse en grafito a temperaturas relativamente bajas, en la presencia de aire a temperaturas alrededor de 700°C y con la atmósfera inerte alrededor de 1500°C siendo la forma metaestable del grafito bajo presiones normales.

*Onda progresiva en un modo acústico de vibración térmica en una red cristalina

Una alta conductividad térmica (el diamante absorbe calor con mayor facilidad), una baja dilatación térmica y su baja grafitización es la clave para que el diamante se degrade rápidamente cuando está sujeto al calor durante periodos largos. Por lo tanto, el esmerilado de carburos deberá realizarse bajo un baño refrigerante para reducir el calor iniciado por la reducción del diamante.

El hecho de que el diamante sea una forma de carbón, induce a esperar algún tipo de interacción con materiales ferrosos que tienda a formar soluciones sólidas con el carbón. La afinidad química del carbón para aceros de bajo carbono, conduce efectivamente a un tipo de reducción química con la formación de compuestos como el carburo de hierro (FeC) durante el esmerilado, pero de ninguna manera existe una disolución completa del diamante en los aceros de bajo carbono

Estabilidad Térmica del CBN e Interacción con el Vapor de Agua

Por su naturaleza química, el CBN no presenta afinidad hacia los aceros de bajo carbono lo que explica por qué es usado con gran éxito en el esmerilado de aceros rápidos. Su estabilidad térmica es excelente comparada con la del diamante. Mientras el diamante comienza a formar dióxido de carbono alrededor de los 700°C, el CBN muestra señales de oxidación sólo arriba de los 1000°C. La capa de óxido de boro constituye una capa protectora contra una oxidación mayor, la total sólo se alcanza con temperaturas arriba de 1900°C. Esta excelente estabilidad térmica se explica por su factibilidad de uso en la práctica para ruedas con velocidades del orden de 30 a 60 m/s (5900 a 12000 sft/min).

La afinidad química del CBN hacia el vapor de agua, constituye una desventaja respecto al esmerilado húmedo. El vapor de agua disuelve la capa de óxido de boro y la superficie del cristal es entonces expuesta a la hidrólisis con la formación de ácido bórico y amoníaco, razón por la cual el esmerilado en seco es preferible al húmedo, con el tipo convencional de líquido refrigerante, constituido sólo de agua y un pequeño porcentaje de aditivo de protección contra la herrumbre. El refrigerante más eficiente para las ruedas de CBN es el aceite mineral sulfuratado. Las emulsiones de aceites sulfuclorinados en agua, con un mínimo de concentración del 10%, son un segundo refrigerante recomendable.

Variedad de Granos de Diamante

No se intenta explicar de manera exhaustiva acerca de todos los granos industriales disponibles actualmente en el mercado. Desde la primera síntesis del diamante en 1950, el número y variedad de granos se han multiplicado de tal forma que hasta los especialistas en el campo tienen dificultades para mantenerse al día de los nuevos desarrollos. Esta multiplicación de tipos de granos tiene causas técnicas y económicas.

El primer aspecto a ser considerado, tiene fundamento científico y concierne al número de parámetros y condiciones en el proceso de síntesis del diamante. No sólo la temperatura y la presión, como se muestra en el diagrama de la figura 3.3, sino el tipo de solventes metálicos, el tipo de grafito utilizado y su origen, las concentraciones respectivas de varios componentes, la posible adición de agentes catalíticos, el procedimiento actual seguido durante el aumento de la temperatura y presión tiene una influencia sobre la nucleación y crecimiento de los granos y de esta manera, sobre su forma, color, resistencia y estructura.

El rango de aplicación del diamante industrial es extremadamente extenso y el rápido desarrollo de la manufactura de granos sintéticos, propician la producción de nuevos granos.

Otro factor que ha influido en la multiplicidad de granos, es la competencia del mercado entre los fabricantes más importantes de diamantes sintéticos, General Electric y De Beers Industrial Diamond Division. Como resultado de esta competencia, varias manufactureras de granos sintéticos han entrado al mercado desarrollando su propia tecnología.

Diamante Natural

Los granos de diamante natural son derivados del boart negro que es un tipo especial de diamante, sólo de utilización industrial debido a su tamaño y forma tan irregulares así como las inclusiones y defectos que impiden su aprovechamiento en joyería. Antes de usarlo como grano industrial en ruedas abrasivas, el boart debe molerse y posteriormente tamizarse en varias mallas.



FIGURA 3.5 Diamante natural. El grano de diamante natural se caracteriza por su forma irregular y una distribución de ángulos de corte totalmente aleatorios (tamaño de grano D151 o malla 100/120).

Durante el proceso de molienda, la fractura de los fragmentos más pequeños ocurre en las zonas donde existen defectos; los granos resultantes del triturado se caracterizan por poseer ángulos de corte muy pronunciados y por una elevada resistencia.

Por su alta resistencia son usados exclusivamente en aglutinantes metálicos o galvánicos. La falta de color es una característica del diamante natural formado en la corteza terrestre en condiciones totalmente diferentes de las utilizadas para la producción de los granos sintéticos industriales, en particular, con la consideración de la presencia de un solvente metálico.

Diamante Sintético

Los variados tipos de grano del diamante sintético se clasifican en dos grandes grupos: granos policristalinos y monocristalinos, los cuales difieren en la forma y en la friabilidad, por lo que existirán diferentes campos de aplicación para cada uno.

Granos Monocristalinos

Los granos monocristalinos se diseñan especialmente para aplicaciones particulares. La forma cubo-octaédrica caracteriza la estructura cristalográfica del diamante. Estos cristales casi perfectos, son obtenidos por un crecimiento lento, un proceso de nucleación de baja densidad, con poca o ninguna interacción entre varios granos creciendo en la estructura.

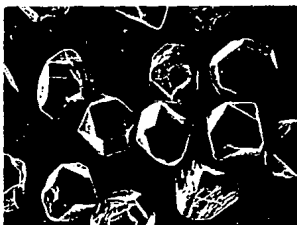


FIGURA 3.6 Diamante sintético monocristalino. Puede notarse la forma en bloque y la irregularidad de los ángulos de corte (tamaño de grano D150 o mallas 100/120).

La relativa escasez de inclusiones metálicas es otro indicio a un proceso de síntesis de crecimiento lento. Debido a su gran dureza y baja friabilidad, esos granos monocristalinos son usados exclusivamente en aglutinantes metálicos. El color amarillo es debido a los átomos de hidrógeno dispersos en la red. La forma en bloque del cristal sintético monocristalino debe contrastar con una forma irregular de grano del diamante natural generado por trituración.

El hecho de que el diamante natural tenga más puntos de corte con más ángulos agudos, explica por qué éste no ha sido desplazado en todas sus aplicaciones industriales por los diamantes sintéticos monocristalinos.

Granos Policristalinos

Para obtener granos con alta friabilidad, el grado de nucleación bajo prensado debe acelerarse tanto que el núcleo del

diamante se precipite en un número tan grande como sea posible. Debido a la cantidad de mezcla, los patrones normales de crecimiento, los cuales dirigirán las características de las formas cubo-octaédrica u octaédrica, son inhibidas por la interferencia mutua de los núcleos de grano. Un procedimiento de síntesis de este tipo corresponde usualmente a una aplicación rápida de presión y temperatura.

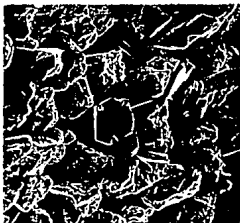


FIGURA 3.7 Diamante sintético policristalino. Puede observarse la forma irregular y la distribución aleatoria de los filos.

Como puede verse en la figura 3.7, los granos resultantes no tienen una forma geométrica definida y consisten de un aglomerado de los cristales más pequeños propensos a fragmentación parcial y ruptura progresiva. Las porciones oscuras, a veces completamente negras dentro de los granos, corresponden a inclusiones metálicas atrapadas durante el proceso de síntesis.

Los cristales frágiles de este tipo son usados en resinas aglutinantes y conducen a ruedas abrasivas de corte libre. La propensión a fragmentación parcial llega a ser incluso más obvia cuando se examina cada uno de los granos policristalinos a gran aumento (figura 3.8). La irregularidad en la

forma, el gran número de líneas o planos de fractura predeterminados son impresionantes y dan bases tangibles al concepto primario de friabilidad, tan importante para el entendimiento del proceso de esmerilado, autoafilado vía progresiva fragmentación parcial del grano durante la vida útil sobre el canto.



FIGURA 3.8 Microfotografía de diamante sintético policristalino. Se observa el filo irregular y numerosas grietas sobre la superficie del grano. La apariencia externa del grano policristalino confirma el concepto de alta friabilidad y fragmentación progresiva del grano (tamaño de grano D150 o malla 100/120).

Grano Policristalino Revestido de Metal

El desarrollo del grano policristalino cambió verdaderamente el aspecto del rectificador con carburo, por medio de la remoción de grandes cantidades de material. Una nueva mejora en la capacidad de esmerilado se logró por la técnica de revestido de metal.

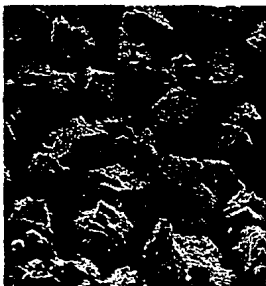


FIGURA 3.9 Grano policristalino revestido de metal. Se observa la superficie rugosa, ideal para la adhesión del aglutinante durante el proceso de sinterizado (grano con 56% de níquel; tamaño de grano D126 o malla 120/140).

La tensión superficial del diamante es tal que el contacto entre resina y diamante es muy pobre, haciendo un enlace difícil que se refleja durante el esmerilado, ya que éste no se realiza de manera adecuada. Contrariamente, el contacto entre la resina aglutinante y el revestimiento de metal encapsulando al grano de diamante es mucho más estrecho; los nódulos metálicos (claramente visibles bajo el microscopio electrónico en la figura 3.10) incrementan considerablemente la superficie efectiva del grano.

Los tipos más comunes de metal revestido usado por las fábricas de granos son níquel y cobre y corresponden a las designaciones primarias RVG-W, RVG-D para General Electric, y CDA55N, CDA50C para De Beers. El metal revestido es hecho por deposición química de un níquel compatible o baño de cobre. El porcentaje en peso puede ajustarse con capas alrededor de 50% de peso, dando los mejores resultados de rectificado.

La función es doble:

a) La mejor retención del grano dentro del aglutinante con progresivas fracturas en partículas o micropedazos con reducción prematura, se despiden granos al por mayor. Esto puede mostrarse por el hecho de que la viruta de diamante obtenido después del esmerilado con metal revestido es más fina que la obtenida con diamantes desnudos.

b) Reducir daños térmicos a la resina aglutinante por el efecto del revestido como un descenso de calor con respecto al calor generado en los bordes de corte que tiene el grano. En ausencia de revestimiento, debido a la alta conductividad térmica del diamante, el calor es rápidamente transferido a la masa de resina sostenida en el grano, con un sustancial riesgo de carbonización del aglutinante. En presencia del metal revestido, el calor primero se dispersa en el revestimiento y la tensión térmica del aglutinante se reduce grandemente.

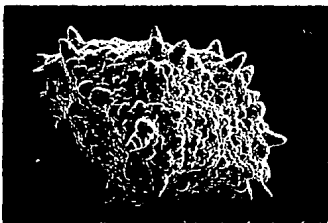


FIGURA 3.10 Detalle de revestimiento bajo microscopio electrónico. Se puede apreciar un gran número de pequeños nódulos de níquel responsables de un incremento en la superficie efectiva de corte en el grano (grano policristalino de 50 μm).

Capítulo 4

AGLUTINANTES

Historia de los Aglutinantes

El aglutinante vitrificado es el más extensamente utilizado, siendo más de la mitad de las ruedas abrasivas fabricadas con este aglutinante, pero es probable que no haya sido el primero en usarse. Resulta imposible decir cuál fue el primer aglutinante en aplicarse a una rueda y en dónde, cuándo y bajo qué circunstancias. El primer antecedente real de un producto abrasivo aglutinado hecho por el hombre, se tiene en 1825 cuando habitantes del este de India llamados Tami-les, aglutinaron corindón con caucho de árboles, procesando ésto para obtener ruedas abrasivas para corte de piedras preciosas.

La rueda de esmeril (una piedra compuesta por corindón, mica y óxido de hierro) fue aglutinada con caucho poco antes de que Charles Goodyear realizara su primer vulcanizado con ayuda de una estufa, siendo expedida después la patente en 1840 para ruedas "vulcanizadas". La primera aplicación formal del aglutinante vitrificado fue en 1842, con la expedición de la patente de un británico llamado Barclay, de una rueda de esmeril aglutinada con "stourbridge loom".

Cuando Brown y Sharpe realizaron su primera máquina de esmerilado en 1863, la rueda se intentó hacer con un disco de acero cubierto posteriormente de esmeril, pero después adoptaron una rueda sólida de esmeril, que sin duda fue una rueda con algún tipo de aglutinante. Una rueda de arcilla y esmeril fue patentada en 1864. F.B. Norton, especializándose

en ruedas abrasivas, describió al aglutinante vitrificado como "vidrio roto, borax u otras sustancias vítreas".

La diversidad de aglutinantes disponibles para cualquier rueda superabrasiva de calidad, es el reflejo del crecimiento del número de aplicaciones donde se espera que las ruedas abrasivas traigan un buen rendimiento al maquinado. Debido al papel predominante del aglutinante en el rendimiento general de una rueda abrasiva, es fácil detectar la exigencia de los usuarios finales hacia los fabricantes para desarrollar aglutinantes para aplicaciones especiales.

En la práctica, suelen emplearse ciertos aglutinantes para abrasivos convencionales y superabrasivos:

a) Abrasivos convencionales: Aglutinante resinoso, vitrificado, goma o hule, shellac.

b) Superabrasivos: Aglutinante resinoso, vitrificado, metálico y electrodepositado.

De este modo, en el transcurso de este capítulo, al referirse a un aglutinante resinoso o vitrificado por ejemplo, podrá asociarse tanto a los abrasivos convencionales como a los superabrasivos; mientras que al mencionar un aglutinante metálico o electrodepositado deberá relacionarse con los superabrasivos.

Las Funciones Primarias de los Aglutinantes

El sentido común dicta que la función primaria del aglutinante es sostener los granos del abrasivo durante el proceso de esmerilado. Sería erróneo, sin embargo, creer que la máxima

capacidad de retención de granos es sinónimo de alto rendimiento. Atendiendo a los cambios que ocurren en el mercado de las ruedas de diamante, en particular, puede decirse que ruedas duras, por ejemplo las ruedas de aglutinante metálico, están cediendo terreno a las ruedas de aglutinante resinoso, caracterizadas por un desgaste más rápido, pero también por un rango mayor en la capacidad de remoción. La tabla 4.1 da una idea de la tendencia en el uso de los aglutinantes resinosos.

TABLA 4.1 Importancia económica de los principales tipos de aglutinantes (tasas de cambio en % correspondientes a 1965 y 1982)*

Año	Ruedas de liga resinosa	Ruedas de liga vitrificada	Ruedas de liga metálica
1965	58	4	38
1982	75	4	21

* Estadísticas de venta de Diametal AG, CH-2500 Biel, Suiza.

El reciente interés en los aglutinantes metálicos ha surgido con el incremento del uso de las máquinas de control numérico, que operan sin supervisión humana constante y que dichas máquinas demandan ruedas abrasivas con menor desgaste.

Las características de grano y aglutinante deben adaptarse uno al otro y deben ser compatibles con la aplicación designada para tener control tanto en el auto-afilado por fractura parcial de grano como en la erosión progresiva del aglutinante durante el proceso de trabajo. Para obtener un eficien-

te auto-afilado a través de fractura parcial de grano así como una exposición paulatina del mismo, requiere prolongados y rigurosos procedimientos de control y monitoreo en las variaciones en rendimiento, ocasionadas por mínimos cambios en la formulación.

El aglutinante ideal debería realizar las siguientes funciones:

- 1) Una adecuada retención del grano, asegurar la acción propia del grano, evitando el desprendimiento prematuro del mismo durante el proceso de esmerilado.
- 2) Erosión controlada que permita dirigir la exposición de los nuevos puntos de corte en forma gradual.
- 3) Características mecánicas adecuadas para asegurar la óptima distribución de fuerzas en el esmerilado de la máquina hacia la pieza de trabajo.
- 4) Una adecuada disipación del calor generado por la acción de los granos sobre la pieza de trabajo y por la fricción de rebaba y pieza de trabajo contra el borde de la rueda.

Las dificultades que se presentan en la formulación del aglutinante parten del hecho de que algunas de estas funciones son mutuamente exclusivas (ver incisos 1 y 2 por ejemplo).

Propiedades Mecánicas del Aglutinante y Rendimiento de la Rueda

Es importante destacar que la friabilidad de grano y la retención de éste por medio del aglutinante son los principales factores en la interfase del esmerilado.

Aunque el aglutinante en sí mismo, como un material definido por su composición y su proceso de manufactura, posee propiedades mecánicas medibles tales como la dureza, resistencia a la ruptura y módulo de elasticidad, se puede esperar una correlación no directa como la que alguna vez se presenta entre la vida útil de la rueda y su rendimiento y, por otro lado, las propiedades mecánicas del aglutinante.

Los valores representativos de propiedades mecánicas para los principales tipos de aglutinantes se proporcionan en la tabla 4.2. Nótese que recorriendo la tabla de izquierda a derecha, la dureza Brinell atraviesa por un máximo en el aglutinante vitrificado, mientras que la resistencia a la ruptura y el módulo de elasticidad se incrementan gradualmente.

TABLA 4.2 Propiedades mecánicas para los tres principales tipos de aglutinantes

Propiedad	Aglutinante resinoso	Aglutinante vitrificado	Aglutinante metálico
Dureza Brinell (kg/mm^2)	228	380	278
Resistencia a la ruptura (kg/cm^2)	1,046	1,243	2,073
Módulo de elasticidad (kg/cm^2)	173,500	599,500	792,000

Los tres aglutinantes se seleccionaron de productos estándar de Diametal AG. CH-2500 Biel, Suiza.

Tipos de Aglutinantes

Los aglutinantes más comercializados derivan su nombre del material retenedor; es decir, el componente responsable de la cohesión de la parte externa de la rueda y de la retención del grano durante el esmerilado, los cuales son: aglutinantes resinosos (B), metálicos (M) y vitrificados (V).

Un hecho común a los tres materiales mencionados es que durante el proceso de sinterizado, el agente aglutinante llega a fluir y humedecer, en cierto grado, a los demás componentes presentes en el borde de la rueda. El agente de aglutinamiento es una forma de polímero sintético o resina en el caso del aglutinante resinoso, un metal o más usualmente una aleación metálica para el caso de aglutinantes metálicos, y un vidrio o cerámico en el caso de aglutinantes vitrificados.

Otro tipo de los aglutinantes empleados para superabrasivos es el aglutinante electrodepositado. Este forma un grupo independiente y se reduce a dos componentes: la capa de níquel electrodepositado dentro de la cual el otro componente, que es el grano abrasivo, queda atrapado.

Aglutinantes Resinosos

Las primeras ruedas aglutinadas de diamante, alguna vez (1930) fueron fabricadas aparentemente con una resina de baquelita, de aquí se deriva la designación de la familia B para ruedas aglutinadas con resina. En Suiza, las primeras ruedas aglutinadas fueron colocadas en el mercado en 1933 bajo la marca SUPERFIX.

El aglutinante resinoso es fundamental cuando se requiere un buen balance entre la vida útil de la rueda y la velocidad de remoción. Las ruedas aglutinadas con resina son de corte libre* y fáciles de usar en un amplio rango de condiciones.

Cuando los aglutinantes resinosos contienen un grano de baja resistencia y con un eficiente auto-afilado de por fragmentación parcial, las fuerzas de esmerilado permanecen relativamente bajas, lo cual significa que los aglutinantes resinosos pueden ser utilizados en máquinas antiguas o inestables sin el riesgo que ocurran vibraciones fuertes que puedan perjudicar a la pieza de trabajo o a la propia rueda.

El rango de condiciones en que los aglutinantes resinosos pueden ser usados eficientemente es mucho mayor que en el caso para ruedas con aglutinante metálico, para las cuales, las situaciones de sobrecarga son mucho más frecuentes. Errores del operador en el manejo de una rueda abrasiva rara vez originan fallas catastróficas, como puede ser el caso con aglutinantes vitrificados o metálicos.

Para obtener el funcionamiento más eficiente de las ruedas con aglutinante resinoso de cualquier composición, se requieren grandes cantidades de líquido refrigerante. Un suministro abundante de refrigerante a la interfase de esmerilado es, particularmente en esmerilados profundos, un requisito para incrementar la eficiencia del esmerilado. El esmerilado en seco es factible con la mayoría de los aglutinantes resinosos, por ejemplo, en herramientas de carburo y reafilados.

* Corte libre es un concepto que refleja cualitativamente la facilidad de remoción en el esmerilado con un pequeño esfuerzo (potencia, generación de calor y ruido bajos)

Para cubrir ampliamente diferentes condiciones de esmerilado solo se requieren de variaciones en la formulación de la resina, tomando en cuenta no sólo la velocidad de remoción y vida de la rueda, sino también ciertos criterios como la forma o la estabilidad química. Un relleno de varios tipos, tales como carburo de silicio, grafito o lubricantes sólidos, puede usarse para influenciar la dureza del aglutinante. Por lo tanto, se pueden considerar tres subcategorías principales de aglutinantes resinosos para el caso de superabrasivos:

a) Aglutinantes Resinosos con Carburo de Silicio

La formulación más tradicional es el uso de resinas fenólicas mezcladas en proporciones adecuadas con granos de carburo de silicio de tamaño definido. La adición de carburo de silicio regula las características de flujo heterogéneo de la mezcla de granos de diamante, carburo de silicio y resina durante el proceso de sinterizado y previene las pérdidas excesivas de resina bajo la prensa. La presencia de carburo de silicio es también benéfica durante el esmerilado al hacer al aglutinante más resistente en relación a la acción abrasiva de los desechos del esmerilado y la fricción de la pieza de trabajo contra el aglutinante durante la interfase.

b) Aglutinantes Resinosos con Lubricantes Sólidos

Desarrollos más recientes en este campo de los aglutinantes incluyen la adjunción de lubricantes sólidos a los componentes tradicionales (resina fenólica y carburo de silicio). Aunque es difícil de analizar en detalle los mecanismos exactos por los que tales lubricantes mejoran el rendimiento, debe asumirse que por reducción de la fricción generalmente,

el lubricante reduce la temperatura de operación a la interfase y el subsecuente carbonizado del aglutinante. Los lubricantes de este tipo son particularmente efectivos en aplicaciones de esmerilado en seco. Tales lubricantes también reducen la dureza dinámica de la rueda y así contribuye a un incremento en la facilidad de corte.

c) Aglutinantes Metaloplásticos

Recientemente, se ha encontrado que combinando una fase resínica y una metálica puede tener ventajas substanciales en el rendimiento y calidad del trabajo de la rueda abrasiva. Dependiendo de la formulación y condiciones de sinterizado, la fase metálica puede ser visualizada de cualquiera de estas formas, como un relleno o como un sujetador parcialmente responsable de la retención del grano. La presencia de una fase metálica ha resultado benéfica en el esmerilado en seco y alimentación profunda.

Común a estos dos tipos de esmerilado es la considerable generación de calor, con el consecuente riesgo de carbonizado de la resina. El tradicional aglutinante resinoso no es buen conductor del calor, así que la excesiva acumulación de calor puede provocar que se dañe la pieza de trabajo. La presencia de un relleno tal como plata y cobre elevará la conductividad térmica del aglutinante y reduce la temperatura de estabilidad del aglutinante. Si está presente un retenedor metálico, tanto la retención del grano como la disipación del calor pueden mejorarse. Usados en conjunto con resinas de alta estabilidad térmica, tales aglutinantes pueden adquirir asombrosas mejoras en el rendimiento, especialmente en operaciones de esmerilado ligero.

Aglutinantes Metálicos

Los aglutinantes metálicos sostienen el grano monocristalino más firmemente que el aglutinante resinoso. Durante el sinterizado, el retenedor metálico, usualmente alguna aleación de bronce, suaviza y humedece los granos de diamante presentes. La excelente retención de grano y la alta resistencia al desgaste abrasivo de la fase metálica, produce ruedas "duras" adaptadas a la forma de esmerilado que se requiere en materiales frágiles tales como vidrio, cerámicos y otras piezas de trabajo duras no metálicas.

Mantener el auto-afilado es posible sólo bajo fuerzas más altas de esmerilado que las encontradas con los aglutinantes resinosos. De aquí, la necesidad de usar en el mayoría de los casos, refrigerante en abundancia para evitar daños térmicos al grano y a la pieza de trabajo. El hecho de que la mayoría de los aglutinantes metálicos contengan cierta porosidad en forma de relleno de grafito, son puntos para una mayor desventaja de los aglutinantes metálicos, por ejemplo la velocidad límite de remoción ligada a la alta resistencia del grano y la alta resistencia del aglutinante contra el desgaste. Estas características, consideradas a priori como grandes ventajas, limita el funcionamiento de los aglutinantes metálicos. Las presiones de esmerilado necesarias para mantener el auto-afilado son compatibles sólo para máquinas rígidas y estables.

En los aglutinantes metálicos se emplean técnicas de metalurgia de polvos usando polvos elementales o pre-aleados. Una desventaja más, con respecto a los aglutinantes resinosos, es la alta temperatura de sinterizado necesaria para la mezcla de la fase metálica, que tiene altos costos de manufactura.

Los aglutinantes vitrificados pueden ser usados en todo caso en el caso de pequeñas áreas de contacto, como en el caso de máquinas pulidoras de levas, ejes o ejes de perfil donde la estabilidad de forma y las altas velocidades de rotación es fundamental. En esas aplicaciones la rueda pasa a la plaza de trabajo en forma intermitente y se evita durante el período liberativo.

Aglutinantes Vitrificados

Recientemente, los aglutinantes vitrificados fueron usados solo cuando se determinara que ninguna resina o aglutinante metálico pudiera hacer el trabajo requerido. Con la llegada de la más reciente generación de aglutinantes vitrificados basados en una imitación del utilizado en las ruedas convencionales de óxido de aluminio, la situación ha cambiado y ya se tienen nuevos desarrollos en el mercado.

Las ruedas con aglutinantes vitrificados combinan (en menor grado) la característica de liberación de corte de los aglutinantes resinosos con la resistencia al desgaste de los aglutinantes metálicos. Siendo el vidrio el principal componente de dichos aglutinantes, resulta una superficie sensible al calor e incluso quebradiza con la adición de un filler no como cobre o grafito.

Las ruedas vitrificadas deberán ser utilizadas con una refrigeración adecuada y en máquinas con flecha rígida, de tal forma que se encuentre al mínimo la vibración. Los aglutinantes vitrificados tienen buen rendimiento en aplicaciones especializadas tales como esmerilado interno de carburo, operaciones de acabado sobre materiales frágiles como el zafiro, en las cabezas de carga de toca-cassettes y herramientas en

forma de diamante. El vidrio como característica del aglutinante vitrificado presupone temperaturas de sinterizado del orden de los 800°C, por lo que se toma especial cuidado durante el sinterizado y en las operaciones fundamentales en dicho proceso. Por tanto, los altos costos de manufactura de los aglutinantes vitrificados es un argumento más para que éstos se utilicen sólo en aplicaciones muy especiales en donde los aglutinantes resinosos y metálicos muestren ineficiencia. La última generación de aglutinantes vitrificados está parcialmente adaptada a los trabajos encaminados al esmerilado del acero inoxidable.

Aglutinantes Electrodepositados

En este caso, la rueda se reduce a una capa superficial de granos de diamante sostenidos por una capa de níquel actuando como un material aglutinante. El espesor del aglutinante electrodepositado es función del tamaño de grano y corresponde al rededor de 1 a 1.5. Así como las herramientas de corte pueden tener prácticamente cualquier forma, éstas son apropiadas para electrodeposición y de dimensiones compatibles para la inmersión completa en un baño, este sistema no requiere de moldeo y puede acoplarse prácticamente a cualquier perfil. Las ruedas fabricadas por electrodeposición son relativamente baratas.

Una aplicación importante de este tipo de aglutinante, es en el esmerilado de perfiles de herramientas de forma de carburo de tungsteno, así como también en el formado y revestido de perfiles sobre ruedas abrasivas convencionales. Debido a lo muy natural del proceso de electrodeposición, las variaciones en la resistencia del aglutinante y en la concentra-

ción de granos son de consideración ya que tienen consecuencia directa en la flexibilidad de la herramienta.

Las mayores ventajas de las herramientas electrodepositadas son los bajos costos iniciales y la posibilidad de producir herramientas con cualquier perfil. Las herramientas tales como los taladros dentales, son fabricados mediante este principio.

Así como los bajos contenidos de diamante se traducen en una vida corta de la rueda abrasiva, los altos rangos de remoción pueden obtenerse en las distintas aplicaciones que van desde el esmerilado interno de carburo de tungsteno hasta el corte de materiales tales como componentes cerámicos, bloques de grafito, semiconductores y azulejos. En cuanto al esmerilado de aceros muy duros, las ruedas galvánicas de CBN constituyen una propuesta excelente por su bajo costo y la carencia de otros procedimientos de preparación de ruedas especiales.

Las ruedas galvánicas son generalmente de corte libre (free cutting) por lo que el autoafilado de la rueda se realiza en forma razonable, aunque trabajando en condiciones extremas, el autoafilado de la rueda resulta muy pobre.

Aglutinantes de Goma

El aglutinante de goma puede ser tanto natural como sintético. Se agrega el sulfuro como un agente vulcanizante. Después del mezclado, pequeños lotes son pasados y repasados por un tren de rodillos hasta que la hoja de goma alcanza el espesor especificado; entonces las ruedas son cortadas como

galletas a un determinado diámetro y tamaño de agujero. Las ruedas son vulcanizadas en moldes bajo presión en hornos entre 300 y 350 °F. El terminado y la inspección son similares a las operaciones para las otras ruedas.

Las ruedas son fabricadas para usos específicos tales como el corte ya que el proceso de manufactura permite la fabricación de ruedas extremadamente delgadas. Las ruedas de goma se usan además como ruedas reguladoras en el esmerilado sin centros realizando una doble operación; y en el terminado de rodamientos de bolas donde se requiere un alto acabado. A pesar de su importancia en estas aplicaciones las ruedas de goma constituyen algo menos que el 10% del total del mercado.

Aglutinantes de Shellac

El shellac es una liga orgánica natural cuyo uso va muy lejos; hoy, sin embargo, los productos aglomerados con shellac representan la menor parte del total del mercado y son usadas para producir altos acabados en árboles de levas, rodillos y cuchillas.

La fabricación de estas ruedas, involucra mezcla del grano abrasivo con el shellac en un mezclador de vapor con el cual se reviste el grano con la liga. Las ruedas en el rango de corte de 1/8 pulg. de espesor o más delgadas son moldeadas a la medida exacta en moldes de acero calentados.

En la tabla 4.3, siguiente se muestra el rendimiento en el esmerilado y comportamiento de los principales tipos de aglutinantes: resinosos, vitrificados, metálicos y electrodepositados.

TABLA 4.3 Rendimiento en el esmerilado y comportamiento de los principales tipos de aglutinantes

Tipo de aglutinante	Metálico (M)	Resinoso (B)	Vitrificado (V)	Electrodeposado (G)
Profundidad de borde	>2mm	>2mm	>2mm	Una capa de grano
Vida útil	larga	limitada	media	limitada
Libertad de corte	limitada	buena a excelente	excelente	buena a excelente
Cantidad de remoción	limitada	alta	media a alta	alta
Precauciones durante el uso	recomendable usar máquina fija estable	ninguna	sensible a impacto y calor	ninguna
Refrigerante	preferible en húmedo excepto en pequeñas áreas de contacto	puede ser en húmedo o seco	en húmedo y en algunos casos en seco	en húmedo y en algunos casos en seco

Capítulo 5

CARACTERISTICAS DE LAS RUEDAS ABRASIVAS

Considerando que una rueda abrasiva se constituye de un material compuesto (abrasivo y aglutinante), resulta importante conocer sus características físicas, para satisfacer adecuadamente una necesidad determinada. No es lo mismo utilizar una rueda de grano grueso para operaciones de desbaste, que una de grano fino para el mismo fin.

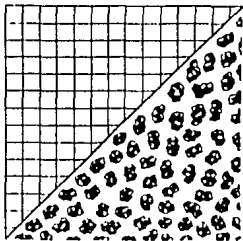
Cualquier fabricante de ruedas abrasivas, sigue una norma para la nomenclatura de estos productos y de acuerdo a ésta, se indican las características de cada rueda en una serie de letras y dígitos.

89A 60 K 5 V A1

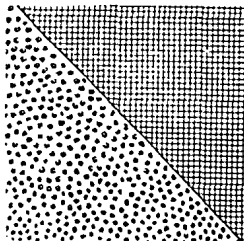
ABRASIVO	TAMAÑO DEL GRANO	DUREZA	ESTRUCTURA	LIGA O AGLUTINANTE	SÍMBOLO INTERNO
A	Muy grueso	Muy blanda	Densa	V = Vitrificada	Símbolo del fabricante
11A	8, 10, 12, 14	D, E, F, G	0, 1, 2	B = Resinosa	
30A	Grueso	Blanda	Mediana		
50A	16, 20, 24, 30	H, I, J, K	3, 4		
70A	Mediano	Mediana			
75A	35, 45, 54, 60	L, M, N, O	Aberia		
88A	Fino	Dura	5, 6		
89A	80, 90, 100	P, Q, R, S	Porosa		
91A	120, 150	Muy dura	7, 8		
C	Muy fino	T, U, V, W			
1C	180, 220	Extra dura	Superporosa		
50C	240, 280	X, Y, Z	9, 10		
	Extra fino				
	320, 400, 500, 600				

a) Tamaño de Grano:

Los diferentes tipos de abrasivos son obtenidos en forma de bloques no uniformes que deben ser molidos y tamizados con la finalidad de obtener la gran variedad de granos requerida. Estos granos son medidos pasándolos a través de cedazos o mallas especiales que contienen un cierto número de hilos por pulgada lineal. El tamaño de grano se determina por el número de aberturas por pulgada lineal por las cuales penetra el grano medido; por ejemplo, un grano que pasa a través de una malla de 24 aberturas por pulgada lineal, es llamado número 24 y tendrá un diámetro promedio de $25.4/24=1\text{mm}$.



Grano No. 8



Grano No. 24

La escala geométrica usada para clasificar el grano abrasivo es estándar para todas las industrias de abrasivos. El rango que va desde el grano 4 hasta el 240 es el más utilizado en la manufactura de ruedas abrasivas. Cabe señalar que tamaños más finos que el grano 240 son separados por levigación (flotación hidráulica ya, que en este nivel dimensional toman la apariencia de harina.

Los granos comerciales se clasifican por su tamaño de la siguiente manera:

Muy Grueso	Grueso	Mediano	Fino	Muy Fino	Extrafino o Polvo
6	12	36	80	220	400
8	14	46	90	240	500
10	16	54	100	280	600
	20	60	120	320	
	24	70	150		
	20		180		

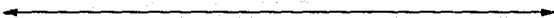
Evidentemente, se emplean granos gruesos donde haya que remover una gran cantidad de material. Los granos finos, por el contrario, se emplean en la remoción de pequeñas cantidades de material, con el fin de dar un mejor acabado superficial. Por ello, la adecuada clasificación de los granos es de vital importancia: un grano 30, incluido accidentalmente en una rueda de grano 120, para pulido, puede perjudicar la superficie de trabajo, ya que es 64 veces mayor que el grano 120 (los volúmenes de granos son proporcionales a los cubos de sus dimensiones lineales).

b) Grado (Dureza):

El grado de una rueda abrasiva indica la resistencia con la cual el aglutinante sujeta a los granos, de tal modo que constituye una medida de la tenacidad y, consecuentemente, de la resistencia al desgaste de la rueda.

La designación del grado es dada por una letra arbitraria, variando desde la rueda blanda (A) hasta la dura (Z). Aunque esta designación se hace por norma, debe observarse que una misma letra de grado en dos ruedas diferentes, no significa que sean idénticas, ya que han sido producidas por fabricantes diferentes.

A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z



Blando

Duro

El grado se relaciona directamente con la cantidad de aglutinante en la formulación de la rueda. Un porcentaje bajo de liga produce alta porosidad, aglutinado débil y acción suave de las ruedas las cuales se desgastan rápidamente porque el grano ya sin filo se desprende con facilidad del aglutinante. Las ruedas de acción dura contienen un alto porcentaje de liga, baja porosidad y alta resistencia de aglutinado que se traduce en una retención firme del grano abrasivo y por ello resisten, sin desgastarse, las grandes presiones ejercidas contra ellas por los impactos del trabajo que tienden a desgranar la rueda.

En el caso donde una rueda es en exceso dura con respecto a la pieza de trabajo, aparentemente no sufre desgaste, pero en realidad no se tiene una sustitución de granos que mantenga constante la acción de corte y solamente produce una acción de roce.

Esta es la razón por la cual se acostumbra emplear ruedas de grado duro para materiales blandos y en áreas de contacto pequeñas mientras que las ruedas de grado blando son recomendables para materiales duros y extensas áreas de contacto.



GRADO BLANDO

GRADO MEDIO

GRADO DURO

c) Estructura:

La estructura indica la densidad (granos por pulgada cúbica) de la rueda abrasiva, o la relación tanto del grano como del aglutinante con los vacíos o espacios que existen entre ellos. Dichos espacios tienen la función de proveer de una profundidad de corte adecuada al grano abrasivo, así como un claro que permita el rápido desalojo de las partículas de material removidas de la pieza de trabajo durante el esmerilado.

Las variaciones en la estructura de la rueda o rango de densidad va desde 1 (densa) hasta 12 (abierta). Aunque puede pensarse que es un rango amplio, en realidad es relativamente pequeño.

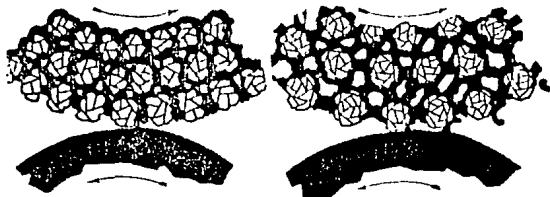
Espaciamiento cerrado	Espaciamiento medio	Espaciamiento abierto	
1	4	7	10
2	5	8	11
3	6	9	12

Cuanto más bajo sea el número, significa que los granos están menos espaciados y se dice que la rueda es de estructura densa. Es utilizada para el esmerilado de contacto lineal tal como el esmerilado cilíndrico.

Números altos de estructura indican un espaciamiento más amplio entre granos y se dice que la rueda es de estructura abierta. Se emplea para el esmerilado de contacto extenso tal como el esmerilado de superficie y en trabajos donde no es deseable la concentración de calor, ya que la rueda cuenta con una porosidad tal que el exceso de calentamiento puede disiparse a través de la estructura.

En la práctica, la experiencia conduce al uso de estructuras estándar que dan resultados satisfactorios en la gran mayoría de los problemas, en los casos presentados por los usuarios.

La estructura o porosidad de la rueda puede controlarse por presiones de moldeo durante su formado inicial. Esta porosidad inducida, la cual no rompe el contacto granular, es generalmente controlado por la adición de cristales de paradiclorobenceno, cristales que se calcinan durante el proceso de cocido para dejar espacios libres en la rueda (porosidades).



Una estructura cerrada, como indica esta ilustración, no ayuda al desprendimiento de las partículas metálicas produciendo el embotamiento de la piedra esmeril.

Esta estructura más abierta, ayuda al desprendimiento de las partículas metálicas y evita que la piedra esmeril se embote.

Capítulo 6

PROCESO DE FABRICACION DE RUEDAS ABRASIVAS

a) Preparación de abrasivos

La siguiente descripción se refiere tanto a las ruedas carburo de silicio como a las ruedas de óxido de aluminio.

Triturado y molido

Después de que las rocas de mineral han sido seleccionadas del triturador a un tamaño adecuado (aproximadamente 6 pulgadas de diámetro), el mineral pasa a otro molino en donde nuevamente se reduce su tamaño a 3/4 pulg. aproximadamente de diámetro. Luego, se vuelve a reducir su tamaño a una medida apropiada para la formulación de ruedas abrasivas.

Separación magnética

Entre los trituradores y los molinos, el mineral pasa a través de los tamices para remover los granos más pequeños y se eliminan algunas impurezas mediante separadores magnéticos que retiran los componentes de hierro que pudieran existir.

Lavado y secado

El material es pasado a través de los lavadores que remueven polvo, mugre y material extraño para que después pueda ser secado.

Tamaño de grano

Los granos de abrasivo son seleccionados mediante tamices vibratorios y se clasifican de la manera descrita en el capítulo 5.

Inspección del grano abrasivo

El grano es inspeccionado verificando su medida (según las mallas) y su contenido magnético para posteriormente alistarse para su almacenaje o ser enviado directamente al área de mezclado para la fabricación de las ruedas abrasivas.

b) Mezcla de los componentes

Los elementos que principalmente constituyen a una rueda abrasiva son: el grano abrasivo y el aglutinante o liga. Las ruedas vitrificadas contienen un elemento adicional llamado aglutinante o liga temporal, y su función es la de brindarle cierta consistencia a la rueda en "crudo" después de haber sido moldeada. Tal aglutinante temporal es evaporado sin dejar rastro en la rueda al ser horneada o quemada. Si la cantidad agregada de aglutinante temporal no es controlada perfectamente, se corre el riesgo de alterar la densidad final de la rueda. La densidad en crudo, se calcula en función del porcentaje de aglutinante temporal seco y humedo, usado en cada mezcla y de la densidad de la rueda después de curada y quemada.

Las ruedas resinosas o con aglutinante de hule, tienen además sustancias minerales llamadas rellenos. Estos sirven para darle porosidad a la rueda y algunos pueden actuar sobre el material de trabajo como lubricantes.

En la fabricación de cualquier rueda abrasiva, todos los pasos a seguir deben realizarse cuidadosamente, ya que un buen mezclado de los componentes es el principio de una buena fabricación. Si los granos abrasivos no quedan perfectamente cubiertos por las demás sustancias, se tendrá una rueda irregular presentando zonas blandas y quebradizas, así como también zonas muy duras.

La humedad de las mezclas con aglutinante vitrificado es muy importante, ya que de ella depende muchas veces la mayor o menor dificultad que se tendrá para ajustar la densidad de las ruedas en crudo, y para asegurar su control, se determina la densidad después de cada cambio de mezcla o después de cada 10 ruedas moldeadas.

Los componentes se mezclan en mezcladora tipo vasiya con aspas movidas por motores eléctricos. El tiempo y velocidad de mezclado dependen directamente del peso y del tipo de mezcla, así como de la consistencia que se quiera dar a la rueda abrasiva.

c) Moldeo

El moldeo de una rueda abrasiva se realiza mediante prensas hidráulicas de diferentes capacidades, según el tipo y tamaño de rueda que se requiera moldear. Tales prensas trabajan mediante un sistema hidráulico, y el cálculo de la presión

manométrica que se debe aplicar a la rueda se efectúa por medio de una relación de áreas:

$$P_m = (A_r/A_p)P_r$$

en la que:

P_m = presión manométrica en Kg/cm²

P_r = presión recibida por la rueda en Kg/cm²

A_p = área del pistón de la prensa en cm²

A_r = área de la rueda en cm²

Las presiones aplicadas sobre una rueda abrasiva varían desde 35 kg/cm² para ruedas con aglutinantes vitrificados, hasta 246 kg/cm² para algunas ruedas con aglutinante resinoso o de hule.

Los moldes empleados consisten generalmente de un cilindro, una base, un perno y una tapa. La altura del cilindro debe ser al menos el doble de la altura de la rueda que se va a moldear, debido a que la mezcla ocupa aproximadamente el doble del volumen después del prensado.

En el proceso de moldeo se utilizan moldes a tamaño para ruedas de 7.62 cm de diámetro y menores, su nombre se deriva de que las ruedas son moldeadas con el tamaño solicitado por el cliente.

Las ruedas moldeadas se colocan en estantes metálicos con piso de tela de alambre para posteriormente ser introducidos en el horno de secado. Las ruedas menores de 45.7 cm de diámetro se colocan sobre placas vitrificadas, las ruedas de mayor diámetro se colocan en los estantes sobre la base en que fueron moldeadas, debido a que se pueden romper al tratar de cambiarlas a las placas vitrificadas.

La mezcla antes de ser moldeada, debe estar lo más homogénea posible así como libre de cualquier sustancia extraña, y para asegurarse de esto, se tamiza sobre mallas de plástico cuyo tamaño de abertura depende del tamaño de grano. Después de ser tamizada se procura no apisonar para que no se formen trozos de mezcla compacta, sobre todo en las mezclas resinosas en las que basta una pequeña presión para endurecerla.

La nivelación de las mezclas dentro del molde es muy importante, porque con ello se controla el posible desbalanceo de la rueda y también la diferencia de densidades entre unos puntos y otros de la misma rueda.

El tiempo que es prensada la mezcla y el número de veces que se hace, depende de su graduación y a la poca o mucha tendencia que tenga la mezcla a expandirse después de ser prensada. Este problema lo presentan las ruedas o productos que contienen en su formulación algún relleno temporal.

d) Secado

El secado de las ruedas abrasivas se puede dividir en tres ciclos que son:

- 1) secador ciclo "A".- Para ruedas vitrificadas pequeñas y granos gruesos.
- 2) secador ciclo "B".- Para ruedas vitrificadas grandes o ruedas pequeñas con granos muy finos.
- 3) secador ciclo "C".- ruedas con aglutinantes resinosos.

El secado de las piezas abrasivas se efectúan para eliminar el aglutinante temporal y otros componentes volátiles que pudiera contener la mezcla, para evitar que en el horneado o curado se agrieten debido a efecto de la presión ejercida por tales compuestos al evaporarse o volatizarse.

La diferencia entre los tres tipos de secado, es el tiempo y la temperatura de secado. Por ejemplo, el secador ciclo "A" trabaja entre 70 y 80 °C por espacio de 24 horas. El secador ciclo "B" trabaja a las mismas temperaturas que el anterior pero con un período de secado de aproximadamente 48 horas y el secador ciclo "C" trabaja entre 40 y 50 °C y 24 horas de operación. Todos estos tiempos y temperaturas de secado, dependen de la densidad de la rueda y de su sección.

El secado se efectúa en estufas eléctricas por medio de corrientes de aire caliente impulsado por los tubos ventiladores, las piezas o ruedas abrasivas se colocan en estantes metálicos con piso de tela de alambre para facilitar la circulación de aire caliente.

Si el secado de las piezas no se realiza correctamente, se corre el peligro de que las ruedas sufran fisuras internas muy difíciles de detectar en el proceso de inspección del producto, y al trabajar con tal rueda se pueden acentuar estas grietas hasta romperse, con el consiguiente peligro para el operador.

Existe una operación intermedia entre el secado y el horneado de los productos abrasivos vitrificados llamada "cepillado" la cual se efectúa en algunos productos para ahorrar tiempo y herramientas en el departamento de terminado.

El diámetro del resaque que se hace en crudo, es generalmente de 5 a 10 mm menor que el especificado por el cliente, porque al cepillar tal resaque, no queda concéntrico con respecto al eje y al diámetro exterior. En el departamento de terminado, el resaque se rectifica.

Una ventaja adicional que brinda el cepillado de la pieza antes de ser horneada, es la posibilidad de recuperar parte de la mezcla antes de que sea horneada ésta mezcla puede ser humedecida nuevamente con la finalidad de fabricar ruedas de desbaste para ferreterías. Estas ruedas resultan muy baratas porque los materiales no son tan controlados.

La mayor parte de los productos de fabricación especial se cepillan en crudo donde se terminan de acuerdo a su tipo solicitado por el cliente. Es importante también que después de cepilladas estas piezas, su manejo se realice con el mayor cuidado para que no sufran desperfecto alguno.

Además de las especialidades, también se cepillan las ruedas que de acuerdo a su tipo deben tener un resaque o alguna forma especial como las mostradas en la figura 6.1.

e) Horneado y curado

Para el horneado o curado de ruedas abrasivas vitrificadas, se utilizan hornos de campana con una capacidad aproximada de tres toneladas de producto abrasivo seco y tres toneladas de placas refractarias, arena y ladrillos separadores. También se utilizan los hornos de cámara cuadrada convencionales, cuya capacidad es menor.

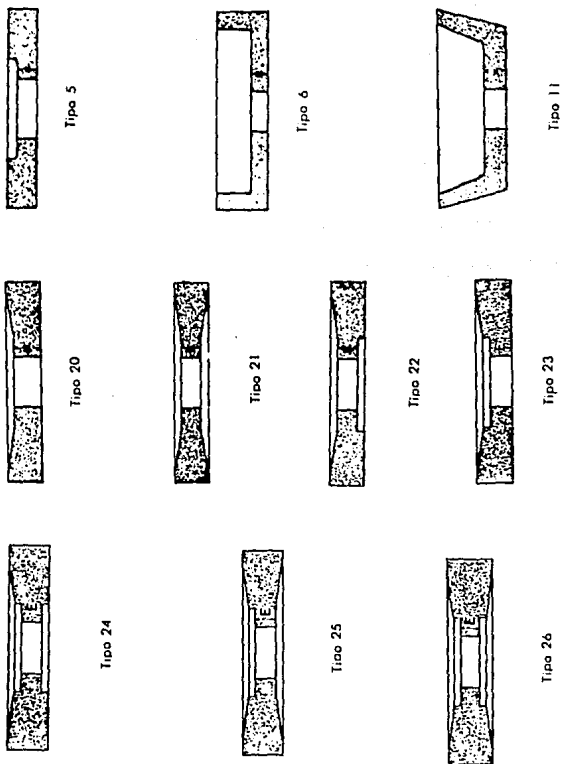


FIGURA 6.1. Algunas ruedas abrasivas que requieren cepillado

- a) Ruedas tipo 5 y 6: resaque recto a un lado.
- b) Ruedas tipo 11: resaque cónico a un lado.
- c) Ruedas tipo 20 a 26: resaque a uno o dos lados de forme especial.

La colocación de las ruedas dentro del horno es muy importante ya que un mal acomodo de las ruedas grandes con las pequeñas y sin orden alguno, traería como consecuencia ruedas parcialmente curadas y frágiles, que no servirían para ningún propósito. Las ruedas grandes se colocan en la parte alta del horno, que es donde la distribución de la temperatura es más uniforme y se evitan rajaduras en las ruedas por las diferencias de contracción entre la superficie y el centro de la rueda. A los lados de la carga se colocan ladrillos refractarios resistentes al calor, para evitar que las flamas incidan directamente en las piezas.

La circulación de los gases calientes también es muy importante y para lograrla lo mejor posible, se colocan las ruedas sobre arena cuyo tamaño depende del grueso del grano de la rueda abrasiva.

También el horneado considera tres ciclos que difieren entre sí hasta alcanzar una temperatura máxima de 1100 °C.

Horno ciclo "A".- Consiste en 84 horas de operación aproximadamente.

Horno ciclo "B".- Consiste en 150 horas de operación aproximadamente.

Horno ciclo "C".- Consiste en 260 horas de operación aproximadamente.

La diferencia entre estos tipos de quemado, está determinada por el tipo de aglutinante empleado, la dureza de la rueda, el tamaño de grano y el tamaño de la rueda.

Las ruedas con aglutinante resinoso o de hule, se curan en estufas a una temperatura aproximada de 200 °C y 10 horas de operación.

f) Terminado

Esta es la etapa final de la fabricación de un producto abrasivo y es la más importante en relación a las dimensiones finales y la forma del producto. Todos los productos son fabricados bajo estrictas normas de calidad, fabricación, forma y aspecto final.

En el departamento de terminado es más fácil evitar errores en relación a las otras etapas de fabricación, debido a que se ve y se puede palpar físicamente la forma de los productos y se puede medir sus dimensiones. Las tolerancias de los productos en cuanto a dimensiones se refiere, establecen límites entre los que se puede surtir al cliente, y a tal, se le deben notificar dichos límites.

Las tolerancias dependen del uso que se le va a dar a la rueda abrasiva, ya que existen ruedas en las que resulta fundamental el espesor, pero no su diámetro. Otras, en las que el diámetro debe ser el exigido y con tolerancias sumamente cerradas o en las que no se permite tolerancia alguna en ninguna dimensión.

Una especificación que resulta indispensable, es la tolerancia en el desbalance de las ruedas, debido a que se pueden perjudicar las máquinas sobre las cuales van montadas tales ruedas. El desbalance es ocasionado generalmente por una falta de homogeneidad al aplicar la presión sobre la mezcla y esto hace que quede un lado con mayor espesor y el otro lado con menor; también se puede provocar el desbalance debido a una mala nivelación de la mezcla durante el proceso de moldeo.

Por lo general, todos los productos abrasivos deben ser terminados en esta fase de la producción, exceptuando a los productos moldeados a tamaño y las especialidades, ya que sólo tienen que marcarse, y las ruedas moldeadas a tamaño se etiquetan y quedan listas para la inspección. Las ruedas grandes y las que no se moldean a tamaño, es necesario terminarlas debido a que los moldes no tienen la medida que solicita el cliente y la razón de esto, es que si se moldean con la medida exacta, se corre el riesgo de tener muchas pérdidas por un simple rozón que se le da a una rueda en crudo, además es necesario que los cilindros y los pernos tengan cierta conicidad para facilitar la extracción de la rueda moldeada.

g) Inspección

El departamento de control de calidad es el encargado de determinar si los productos elaborados están dentro de las especificaciones que rigen la calidad de los productos. Estas especificaciones se refieren a las tolerancias en las medidas del diámetro, eje, altura, resagues y caras especiales, desajustes, desbalance máximo permitido, densidad, velocidad máxima de operación, marcado, etiquetado, etc.

Un punto al que se le brinda mucha atención e importancia, es la velocidad de trabajo de la rueda abrasiva, ya que ésta varía de acuerdo con el tamaño y el tipo de rueda. Todas las ruedas que se fabrican tienen que pasar la prueba de velocidad, en especial las de gran tamaño. Tal prueba consiste en colocar la rueda y hacerla girar hasta un 50% en exceso de su velocidad límite de trabajo.

La densidad se obtiene por el método común de pesar y medir la rueda descontando el peso y el volumen de cualquier refuerzo o material extraño contenido en ella. Se divide el peso del abrasivo entre su volumen y se obtienen la densidad real de la rueda.

La densidad y dureza de las ruedas abrasivas se controla haciendo pruebas al menos en una rueda por cada 5 producidas cuando los lotes son muy grandes, y rueda por rueda cuando los lotes son pequeños.

La dureza se obtiene por medio de una máquina de grado de impacto, que consiste esencialmente en una barra de acero accionada por un electroimán que hace que la barra golpee al mismo tiempo que gira, perforando la rueda. Esta barra tiene en la punta un utensilio de acero especial cuyas dimensiones varían de acuerdo con el tamaño del grano y la dureza de la rueda; de esto depende también la altura desde la cual golpea la barra. La dureza se obtiene comparativamente por la profundidad con que haya penetrado el utensilio.

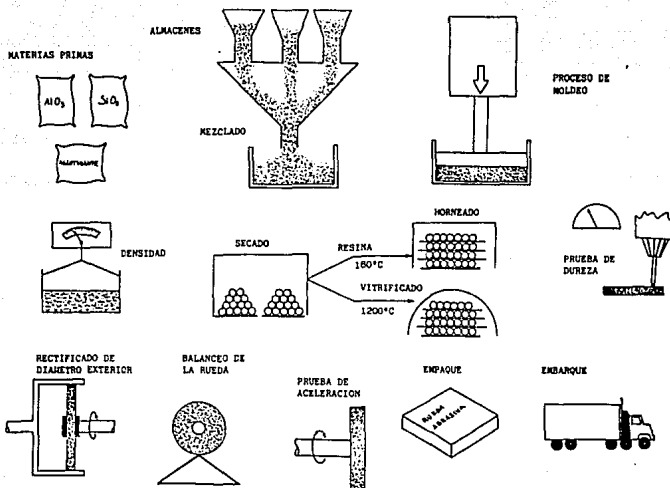


FIGURA 6.2 Manufactura de abrasivos
Diagrama de proceso

Capítulo 7

USOS Y APLICACIONES DE LAS RUEDAS ABRASIVAS

En primer lugar, debe enfatizarse que este tema se basa primordialmente en la experiencia adquirida en el campo de trabajo. Muchas de las aplicaciones que se presentan, parten de recomendaciones hechas por los mismos fabricantes de ruedas abrasivas, lo cual no significa que se limite a la rueda para un solo propósito sino que resulta ser la mejor forma de obtener el más alto rendimiento de la misma.

Los usos comunes de las ruedas abrasivas son:

Desbaste: Tiene como propósito dar una aproximación dimensional a la pieza de trabajo y se caracteriza por sus altos volúmenes de remoción de material y un acabado burdo.

Rectificado: Esta operación se realiza cuando se requiere dar una alta precisión a las dimensiones de la pieza. Se puede intuir que la cantidad de material removido es mucho menor que en el desbaste ya que se tiene un acabado fino sobre la pieza de trabajo.

Pulido: El pulido es una operación de acabado superficial de alto nivel donde el volumen de remoción de material es despreciable.

Corte: El corte tiene como propósito la remoción abundante y rápida de material para seccionar una pieza de trabajo.

Atendiendo a las propiedades de las ruedas abrasivas y a las materias primas que la constituyen, pueden enlistarse las aplicaciones más frecuentes:

a) Tipo de Abrasivo

Un grano abrasivo ideal tiene la capacidad de fracturarse antes de perder por completo su filo y de ofrecer la máxima resistencia en el punto de contacto. Estas características se deben a una estructura cristalina especial y condiciones de fractura determinadas.

Oxido de Aluminio

Se emplea generalmente para el esmerilado de aceros al carbono, aceros aleados, aceros rápidos, hierro recocido (maleable), hierro formado, bronce duros y materiales similares.

Las aplicaciones más frecuentes que se presentan para los óxidos de aluminio:

- Trabajos pesados como piezas de fundición
- Aceros sensibles al calor
- Esmerilado cilíndrico sin centros para hierro fundido, hierro dúctil, aceros de alto carbono y aceros rápidos
- Afilado de alta velocidad para aceros forjados e inoxidables, fundiciones y acero para herramientas

Carburo de Silicio

Se emplea de manera general para el esmerilado de hierro

gris de baja resistencia a la tensión, hierro fundido, bronce suave, cobre, aluminio, piedra, mármol, hule, aleaciones con endurecido superficial y carburos cementados (herramientas de corte).

Carburo de Boro Cúbico (CBN)

Constituye la mejor opción para el esmerilado de aceros rápidos. Es, además, efectivo en aleaciones al alto níquel y aceros endurecidos (50 RC y más duros). Las ruedas de CBN proporcionan los medios para obtener una excelente geometría manteniendo la integridad del metal lo cual compensa el alto costo inicial de estas ruedas.

Diamante

El abrasivo de diamante se emplea particularmente para el esmerilado de carburos cementados, así como materiales no metálicos.

b) Tamaño de Grano. Pueden seguirse las siguientes reglas:

- Grano Grueso: 1) Para materiales suaves, dúctiles tales como aceros suaves o aluminio
- 2) Para altas velocidades de remoción
- 3) Donde el terminado no es importante
- 4) Para amplias áreas de contacto

- Grano Fino:
 - 1) Para materiales duros, frágiles tales como aceros para herramientas, carburos cementados y vidrios
 - 2) Para acabados finos
 - 3) Para pequeñas áreas de contacto

c) Grado

- Grado suave:
 - 1) Para materiales duros tales como aceros duros para herramienta y carburos
 - 2) Para amplias áreas de contacto
 - 3) Para altas velocidades de remoción
- Grado Duro:
 - 1) Para materiales suaves
 - 2) Para estrechas áreas de contacto
 - 3) Para una vida larga de la rueda
 - 4) En máquinas de potencia elevada

En general, el esmerilado húmedo permite el uso de ruedas más duras que para el esmerilado seco sin peligro de calentar en exceso el trabajo.

- d) Aglutinante: La elección de un aglutinante depende de la velocidad, tipo de operación y de la precisión requerida.
- Vitrificado: Es el aglutinante más común para el esmerilado de precisión. La porosidad y liga dan un alto nivel de remoción mientras su rigidez ayuda a lograr alta precisión. Estas ruedas no son afectadas por el agua, aceites o variaciones ordinarias de temperatura.

- Resinoso: Empleado en las ruedas para talleres, fundidoras, afilado de sierras y en muchas aplicaciones de precisión. Diseñadas para altas velocidades, estas ruedas sobresalen por las grandes cantidades de remoción, así como también en aplicaciones que requieren mejores acabados. Este aglutinante se utiliza además en ruedas de corte; velocidades muy grandes (mayores que 9,500 SFPM) se restringen para productos resinosos reforzados.
- Goma: Este aglutinante es utilizado donde el acabado es muy importante.
- Shellac: Produce un alto nivel de acabado en árboles de levas y rodillos de laminación. Se utiliza cuando se requiere una acción moderada o acabados finos (no recomendable para trabajos duros).

Si atendemos a la naturaleza de los materiales de trabajo se requiere conocer el tipo de operación que va a realizar la rueda para establecer la tendencia de uso de un tipo de grano y aglutinante (características más relevantes de una rueda).

A continuación se presentan los materiales en los cuales las ruedas abrasivas tienen la aplicación más frecuente como son los metales (ferrosos y no ferrosos), vidrios, plásticos, cerámicos y maderas; así como la tendencia de uso correspondiente a cada operación:

METALES

-Metales no ferrosos

- a) Corte: Granos abrasivos de óxido de aluminio
Aglutinante resinoso y a veces de goma
- b) Desbaste: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante resinoso (velocidades altas) o vitrificado
- c) Rectificado: Granos abrasivos de óxido de aluminio o
carburo de silicio
Aglutinante resinoso (velocidades altas) o vitrificado
- d) Pulido: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante vitrificado

- Metales Ferrosos

- a) Corte: Granos abrasivos de óxido de aluminio
Aglutinante resinoso
- b) Desbaste: Granos abrasivos de óxido de aluminio
Aglutinante vitrificado
- c) Rectificado: Granos abrasivos de óxido de aluminio
Aglutinante vitrificado
- d) Pulido: Granos abrasivos de óxido de aluminio
Aglutinante vitrificado

VIDRIOS

- a) Corte: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante de goma
- b) Desbaste: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante vitrificado
- c) Rectificado: En vidrios, el desbaste se considera un
rectificado
- d) Pulido: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante vitrificado

PLASTICOS

- a) Corte: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante resinoso
- b) Desbaste: En plásticos el envase se considera como
un rectificado
Aglutinante vitrificado
- c) Rectificado: Granos abrasivos de óxido de aluminio o
carburo de silicio
Aglutinante vitrificado (ligero predominio)
- d) Pulido: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante vitrificado

CERAMICOS

- a) Corte: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante resinoso
- b) Desbaste: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante vitrificado
- c) Rectificado: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante vitrificado
- d) Pulido: Granos abrasivos de carburo de silicio
Aglutinante vitrificado

MADERAS

Las operaciones se realizan con granos de óxido de aluminio y aglutinante vitrificado.

Capítulo 8

SITUACION ACTUAL DE LA INDUSTRIA DE LOS ABRASIVOS EN MEXICO

México al igual que otros países que cuentan con una industria en desarrollo requiere gran cantidad de productos abrasivos, siendo los principales consumidores la industria automotriz y del acero.

El presente estudio sobre la situación actual de la industria de productos abrasivos considera dos aspectos importantes: la demanda de abrasivos y su avance tecnológico. En el primer caso, se debe destacar que de acuerdo a la situación de los sectores automotriz y siderúrgico, los abrasivos se hallaran directamente ligados; es decir, un crecimiento de la industria automotriz provocará un crecimiento productivo y tecnológico en la industria de los abrasivos. En el segundo caso, al igual que el primero, el avance tecnológico de los productos abrasivos está directamente relacionado con el avance de las industrias automotriz y del acero, fundamentalmente.

De aquí, la justificación para considerar a los sectores mencionados como los principales indicadores del desarrollo en la industria de los abrasivos de que se hace referencia en el capítulo 1.

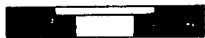
En la tabla 8.1 se contemplan los aspectos más importantes con respecto a los abrasivos y a los dos principales fabricantes nacionales para presentar de una manera condensada un panorama general de la situación actual de la industria de los abrasivos en México.

FABRICANTE DE PRODUCTOS ABRASIVOS	CAPTACION DE MATERIAS PRIMAS (%)		METODO DE FABRICACION DE RUEDAS	EMPLEO DE NUEVAS TECNOLOGIAS EN EL PROCESO DE FABRICACION	DEMANDA DE NUEVOS PRODUCTOS	PRODUCTOS ABRASIVOS DE MAYOR DEMANDA EN EL MERCADO	
	Nal.	Imp.				Nal.	Exp.
AUSTROMEX	60	40	Prensado y cocido	Regular	Alta	Discos tipo 27 Discos de corte tipo 5	
CIA. NACIONAL DE ABRASIVOS (CARBORUNDUM)	30	70	Prensado y cocido	Bajo	Alta	Discos tipo 27 Puntas montadas	

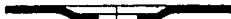
FABRICANTE DE PRODUCTOS ABRASIVOS	PRINCIPALES SECTORES CONSUMIDORES DE RUEDAS	CONSUMO DE RUEDAS SUPERABRASIVAS (DIAMANTE Y CBN)	COMPETITIVIDAD DE SUS PRODUCTOS EN EL EXTRANJERO	DESTINO DE SU PRODUCCION (%)	
				Nal.	Exp.
AUSTROMEX	Automotriz Ind. del acero, palierfas.	Bajo	Muy alta	100	-
CIA. NACIONAL DE ABRASIVOS (CARBORUNDUM)	Automotriz Ind. del acero	Bajo	Muy alta	95	5

TABLA 8.1 PANORAMA GENERAL DE LA SITUACION ACTUAL DE LOS ABRASIVOS EN LA INDUSTRIA NACIONAL (FUENTE: MISMAS EMPRESAS).

ESTÁ
SALA DE LA
BIBLIOTECA



Disco de corte tipo 5



Disco tipo 27



Puntas Montadas

Capítulo 9

CONCLUSIONES

De acuerdo con lo planteado en el presente trabajo, se tiene que con el gran avance tecnológico de los últimos años, muchos de los abrasivos sintéticos han desplazado a algunos abrasivos naturales, debido a que a los sintéticos se les puede dotar de propiedades especiales para alguna aplicación dada, así como adecuar sus características físicas como la dureza o la friabilidad.

Los dos tipos de abrasivos más utilizados en la fabricación de ruedas abrasivas son el carburo de silicio y el óxido de aluminio, debido a sus propiedades y su bajo costo. Para aplicaciones donde se requieren condiciones muy específicas de dureza y de resistencia a las elevadas temperaturas del esmerilado, las ruedas de diamante y de CBN se emplean con gran éxito.

En México, el uso de superabrasivos es muy escaso, debido a que se requieren máquinas de alta precisión y a su alto costo de fabricación. Sin embargo, la introducción de equipos automatizados en el país ha favorecido el incremento en la demanda de estos productos.

En el proceso de fabricación de ruedas abrasivas no se han tenido variantes significativas desde su inicio; lo que ha cambiado son los equipos y las herramientas utilizados para el proceso. Por tanto, el nivel de producción alcanzado hasta hoy, así como la calidad del producto han mejorado considerablemente.

A pesar del poco avance tecnológico que se tiene dentro del proceso de fabricación de ruedas abrasivas, la calidad que alcanzan es altamente competitiva con respecto a las producidas en el extranjero.

México puede considerarse como un país autosuficiente en el ramo abrasivo pero no como un gran exportador porque aún cuando cuenta con la estructura tecnológica suficiente para satisfacer las fuertes demandas internas, sólo destina un pequeño porcentaje de su producción total al extranjero.

Actualmente, los fabricantes nacionales están fortaleciendo sus centros de investigación y desarrollo debido a la creciente gama de aplicaciones que están surgiendo y a los diversos materiales existentes en la industria en general.

BIBLIOGRAFIA

Abrasives

Coes, L. Jr.

Springer Verlag, N.Y. 1971

Advanced Grinding Practice

Hamilton, Douglas T.

Industrial Press, N.Y. 1969

Grinding Wheel and Their Uses

Heywood, Johnson

Edit. Pelton, 1972

Grinding Technology

Krar, S.F.

Delmar Publishers Inc. 1974

The Grinding Wheel

Lewis, Kenneth; Schileicher, William

tercera edición 1971

Lectures on Abrasives and Grinding

Norton Company, 1976

Machining with Abrasives

McKee, Richard L., 1982

Saga of the Abrasives Industry

Collie, Muriel

Metzger Co., 1982

CATÁLOGOS

Catálogo General Austromex, México

Catálogo de Superabrasivos Austromex,
México

Catálogo Bay State, Cleveland

Standard Stock and Especification Manual
Catalog No. 100 Norton. sept. 1986
Worcester, Massachusetts, USA

Programa de adiestramiento de abrasivos
ligados, Norton Company
Worcester, Massachusetts, USA

Catálogo General Carborundum, México

Catálogo de Abrasivos para rectificado de
cigüeñales y árboles de levas, Carborundum
México

Borazon CBN
General Electric Superabrasives Trademark
GES 85-606, 1988