

# MICROESTRUCTURA DE LAS CERAMICAS DE OXIDO DE ALUMINIO Y CARBURO DE SILICIO

(CONSTRUCCION Y PROPIEDADES DE LAS PIEDRAS DE ESMERIL)

Por

M. MOSER

Cátedra de tecnología química de la Universidad técnica de Budapest

Recibido el 16 de Mayo de 1980

La base de las verificaciones de esta obra de compendio, la constituyen los propios resultados de investigación más importantes de las siguientes dos monografías publicadas por la Editorial Academia:

MOSER, M.: Kerámiai kötészű köszörűszerszámok (Piedras de esmeril de enlace cerámico).

Editorial Academia, Budapest 1971.

MOSER, M.: Microstructures of Ceramics

(Microstructure and properties of grinding tools).

Editorial Academia, Budapest 1980.

(La monografía en idioma húngaro es una edición ampliada y modernizada.)

Las tesis que sirvieron como punto de partida fueron las siguientes: "Las piedras de esmeril integradas por partículas de corindón con enlace cerámico, instrumentos poco conocidos y de alta precisión en la realización de acabados."

La base científica de su obtención es el resultado de varias décadas de concienzudas investigaciones. Estos resultados apenas son conocidos por uno o dos poderíos industriales y utilizados por ellos mismos, siendo secretos de fabricación, inalcanzables para el público.

En numerosos lugares, así como en Hungría, su fabricación está dirigida por la empírica sin ninguna tradición científica.

Los trabajos alcanzables, relacionados con la fabricación y utilización de las piedras de esmeril, se caracterizan por examinar independientemente uno del otro la fabricación de las piedras de esmeril y los problemas del esmerilado.

Para un acabado preciso, es necesaria la utilización de piedras de esmeril con una estructura definida y conocida.

Los problemas teóricos y prácticos de las piedras de esmeril de enlace cerámico no son conocidos; por este motivo, he escogido la tarea de analizar

las condiciones de su utilización, partiendo desde el punto de vista de los principios fundamentales de su fabricación.

Basándome en el trabajo realizado, he llegado a los siguientes conclusiones:

1. Analizando el proceso del esmerilado, he determinado que las piedras de esmeril con enlace cerámico, *están* integradas por partículas esmeriladoras de propiedades similares y por puentes del material de enlace.

2. Basándome en mis observaciones realizadas con el microscopio electrónico, he llegado a la conclusión de que no es la partícula esmeriladora, más el material de enlace conjuntamente, lo que integra el elemento básico de las piedras de esmeril de enlace cerámico; contrario a la opinión generalizada, he determinado que las piedras de esmeril las integran el conjunto de las partículas de corindón que a su vez están formadas por microcristales apoyados por los pilares del material de enlace.

3. En base a los exámenes realizados con microscopios ópticos y electrónicos, y los análisis termoanalíticos y roentgenográficos, he determinado que la cuestión fundamental que se debe tener en cuenta en el esmerilado y en la fabricación de piedras de esmeril es:

Solamente partículas de corindón integradas por cristales casi isométricos y de textura homogénea son utilizables en la fabricación de piedras de esmeril con una textura ordenada.

4. En un esmerilado correcto las partículas de corindón preparado de bauxita ( $\alpha$ -óxido de aluminio) incrustadas en el material cerámico, denominadas a continuación como "piedra esmeriladora elemental", se desgastan continuamente; en dicho proceso de desgaste los microcristales de las partículas de corindón y los micropuentes del material de enlace se desgastan a la par.

5. En el proceso del esmerilado es necesario fijar las condiciones del autoafilado de la "piedra esmeriladora elemental".

6. Las propiedades de los puentes del material de enlace entre las "piedras esmeriladoras fundamentales" determinan el funcionamiento de la piedra de esmeril.

7. Las modernas piedras de esmeril están integradas por puentes de material de enlace de forma prácticamente hiperbólica, cuya medida, forma geométrica y propiedades se pueden determinar a través de la morfología y propiedades capilares de las partículas de corindón y del material de enlace, y mediante la tecnología utilizada en su fabricación.

8. Para alcanzar que las partículas tengan una medida y forma determinada con puentes del material de enlace con las propiedades deseadas, es necesario que la fabricación de tales piedras se realice a partir de materias primas de constitución mineral y granular invariable y mantener un tratamiento térmico definido en su fabricación. Las condiciones para obtener los puentes de material de enlace deseados, a partir de las materias primas exami-

nadas por mí y con la ayuda de las condiciones tecnológicas, las he demostrado a cabalidad.

9. Los más modernos conocimientos acerca del proceso de esmerilado, los exámenes de dureza, termoanalítico y roentgenográficos realizados, más los resultados de las experiencias de esmerilado, demuestran que las propiedades óptimas de los puentes del material de enlace no las determina el estado amorfo, como afirma la opinión tradicional, sino una combinación en proporciones y calidades determinadas del estado amorfo y el cristalino, que asegura la tenacidad necesaria para el autoafilado de las partículas esmeriladoras.

10. En el transcurso de mis investigaciones se demostró que el concepto actual de "dureza del enlace" no tiene contenido real, por este motivo es necesario buscar otra propiedad que sirva de medida en el uso de las piedras de esmeril.

Los resultados de mi trabajo han sentado las bases para la resolución de dicho problema.

*La continuación y desarrollo del tema tanto desde el punto de vista práctico como científico se fundamenta en los siguientes puntos:*

a) La situación internacional relacionada con este tema, presentada en la introducción de mi trabajo investigativo desde entonces no ha variado. El desconocimiento de los factores fundamentales que determinan las propiedades de las piedras de esmeril aún impide el desarrollo necesario en la medida exigida por la técnica del acabado mediante el uso de piedras de esmeril. Para fundamentar mis afirmaciones hago mención de los siguientes factores:

En el mundo entero un gran número de representantes de numerosas instituciones de enseñanza superior e institutos de investigación (40 universidades y 100 institutos de investigación) se agrupan en la organización internacional denominada C.I.R.P. (Collège International pour L'Étude Scientifique des Techniques de Production Mécanique, Paris) (Colegio Internacional para el Estudio Científico de las Técnicas de Producción Mecánica). Dicha organización se reúne anualmente, donde la discusión de los resultados alcanzados en relación con este tema se encuentran siempre en la orden del día.

En la conferencia realizada en Pittsburgh en el año 1972 B. Colding (Suiza), W. König, C. Pahlitzsch (República Federal Alemana), J. Pekelharing (Holanda) y J. Péters (Bélgica) dirigentes de gran alcance dentro de C.I.R.P. en su conferencia común (Recent Research and Development in Grinding), dieron a conocer las exigencias en el futuro cada vez mayores frente a las piedras de esmeril. Sus predicciones del futuro fueron basadas en un cuestionario formulado por la C.I.R.P. a la „Corporation Rand" de California sobre la utilización del método "Delphi" desarrollado por dicha corporación. Según sus datos, la proporción del acabado mediante el esmerilado crece más aún y alcanza, del total de los métodos de acabados, el 50%. La mayor productividad en el acabado y una utilización más económica son los objetivos fundamenta-

les de las investigaciones. Estos objetivos se pueden alcanzar con una mayor velocidad en el esmerilado y una disminución del desgaste de la piedra de esmeril. La velocidad tangencial utilizada hasta el momento es de 60 m/s, en ocasiones utilizan 120 m/s. En experiencias de laboratorio, con máquinas especiales, ya se ha alcanzado los 200 m/s y para el año 2000 se estima que los 300 m/s serán utilizables. Las condiciones primordiales para este desarrollo revolucionario de la técnica del esmerilado consisten en el conocimiento profundo de la microtextura y de las propiedades mecánicas de las piedras de esmeril.

El presente trabajo investigativo es considerado en los respectivos foros internacionales como la primera fase de la creación de las condiciones anteriormente enumeradas.

Los resultados alcanzados en mis investigaciones relacionadas con el tema, no sólo los he dado a conocer en las conferencias realizadas en mi país sino también en reuniones del C.I.R.P. y en distintas universidades extranjeras:

1969—1970	<i>Leuven</i> , Instituut voor Werktuigkunde, Universiteit, Leuven,
1970	<i>Torino</i> , C.I.R.P. conferencia
1972	<i>Pittsburgh</i> (Pa.) conferencia
1973	<i>Ljubljana—Bled</i> conferencia
1974	<i>Innsbruck</i> , Universität Innsbruck, Technische Fakultät, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung
1975	<i>Leoben</i> , Montan-Universität, Institut für Gesteinshüttenkunde und feuerfeste Baustoffe
1979	<i>Pittsburgh</i> (P.a.) A.E.S. Konferenz

En Bélgica en 1972, un extracto con 98 páginas en francés de mi monografía publicada en 1971, al cual se le dió el siguiente título:  
Moser, M.: Fabrication et qualification des meules vitrifiées.

CRIF. Bruxelles 1972

b) Aún en el presente, en Hungría las piedras de esmeril para la industria de maquinarias y para realizar trabajos de acabados más exigentes, son importadas. La fabricación de piedras de esmeril de alta precisión en número de más de 10 000 unidades anualmente, a escala de laboratorio y de planta piloto en la cátedra de Tecnología Química de la Universidad Técnica de Budapest a través de muchos años consecutivos, basándose en los resultados alcanzados en mis investigaciones tanto teóricas como prácticas, demuestra ampliamente la importancia práctica de mis investigaciones. Tales piedras de esmeril de alta precisión sustituyen las fabricadas por los países desarrollados y conseguidas mediante la importación.

La fabricación se pretende aumentar en un futuro, para lo cual ya se están preparando las condiciones necesarias. Debido a las limitaciones en la capacidad, la cátedra de Tecnología Química de la Universidad Técnica de

Budapest dedica practicamente toda su capacidad de producción en la elaboración de piedras de esmeril especiales para la Fábrica de Automóviles de Csepel y la Fábrica de Vagones y Maquinarias (Győr), además hemos fabricado en varios miles de unidades, piedras de esmeril de precisión a las siguientes empresas e instituciones:

Fábrica de Aluminio, Budapest

Fábrica Central de Herramientas e Instrumentos, Budapest

Fábrica de Mecanismos Propulsores y Elevadores, fábrica número 2 (ATRA) Budapest

Empresa que agrupa a las Pequeñas Industrias, Budapest

Empresa de fabricación y suministro de repuestos para la industria ligera, Budapest

Unidades Húngaras Productoras de Cojinetes, Debrecen

Unidades de Producción de Herramientas y Tornos, Budapest

Instituto de Desarrollo de la Industria de Herramientas y Maquinarias, Budapest

Fábrica de Radio y Televisión VIDEOTON, Székesfehérvár

En este punto hago destacar que las tesis de mi trabajo resultaron ser correctas durante las investigaciones realizadas durante el período comprendido entre 1965—1975, sirviendo como base del correspondiente desarrollo posterior.

c) Con anterioridad a la aparición del resumen de los resultados alcanzados por mis investigaciones, eran conocidos los siguientes importantes datos:

Durante el esmerilado de cualquier pieza, desprendemos de ésta un gran número de pequeñas virutas con la ayuda de las partículas esmeriladoras de gran dureza las cuales presentan puntos o lados afilados.

En la segunda mitad del siglo pasado, al inicio de la fabricación de piedras de esmeril artificiales, comienza a ganar terreno en gran medida el uso de las piedras de esmeril en el acabado de superficies. En las últimas dos décadas el uso del esmerilado ha recibido nuevamente un gran impulso mediante el aumento de la potencia en el esmerilado y precisión en el acabado. En nuestros días el esmerilado sustituye la torneadura, el avellanado, el cepillado, el descascarado y el partido a trozos.

Los detalles de la teoría del esmerilado no se han estudiado tan a fondo como el acabado realizado con herramientas que poseen una forma geométrica definida como por ejemplo el torneado.

Las piedras de esmeril se describen mediante su forma geométrica, su tamaño, por la calidad y tamaño de las partículas esmeriladoras, el tipo de enlace entre ellas, y por la dureza y aglutinación del tipo de enlace. La dureza del enlace representa la resistencia que presenta la piedra de esmeril frente a los efectos mecánicos sobre su superficie.

La mayoría de las piedras de esmeril se fabrican con partículas integradas por corindón de alúmina en un 80% y un 20% carburo de silicio, unidas

por medio de enlace cerámico, puesto que este tipo de enlace da la posibilidad de fabricar piedras de esmeril de gran dureza, textura porosa, resistente al calor y a la humedad, y de regularizable calidad de la dureza y la medida aglutinadora del enlace.

Las piedras de esmeril de enlace cerámico se fabrican mediante los métodos de trabajo de la cerámica, siendo su propiedad fundamental la capacidad de autoafilarse. El autoafilado lo hacen posible por una parte la textura de la piedra de esmeril y por otra, las propiedades de las partículas esmeriladoras. Durante el proceso del esmerilado las partículas esmeriladoras que se encuentran en la superficie de trabajo de la piedra de esmeril se desgastan; con el avance del desgaste crecen las fuerzas que actúan sobre dichas partículas por lo cual éstas se desprenden parcial o totalmente de la piedra de esmeril. Detrás de las partículas desprendidas se encuentran nuevas partículas afiladas, por este motivo la superficie de trabajo es constantemente regenerada.

La gran variedad de los materiales que se trabajan mediante el esmerilado y a su vez los distintos tipos de acabados, exigen una dotación muy diversa de piedras de esmeril.

La fabricación de las mismas se puede lograr utilizando distintos tamaños, cantidad y tipos de partículas; también con la correcta elección del material de enlace, y además variando las condiciones de la fabricación. La combinación de los factores anteriores puede elevar a muchas decenas de miles el número de gravaciones de piedras de esmeril utilizables en la práctica.

d) Debido a la naturaleza del tema examinado y a que esto significa gran terreno de numerosas ramas de la ciencia, para la representación de los resultados adquiridos durante la investigación, se necesita gran cantidad de figuras ilustrando los estudios realizados.

Al seleccionar la gran cantidad de figuras que obtuve en el transcurso de dos décadas de trabajo investigativo y en la elaboración del resumen, tuve que buscar la forma subjetiva para hacerlo, toda vez que no habían antecedentes en el terreno.

En la segunda monografía logré organizar "la representación proporcional" de los campos extendidos y entre sí estrechamente relacionados, de las investigaciones de la microtextura.

En mi trabajo de resumen determino las partes características de la estructura del trabajo investigativo. A fin de no extender demasiado el trabajo, algunos campos detalladamente examinados figuran sólo como figuras ilustrativas.

A través de algunos ejemplos mostrados con todos los detalles, han sido presentadas las tareas y los estudios realizados; dos rasgos con naturalezas diferentes de la estructura del resumen se presentan con gran número de ilustraciones. Una de estas partes profundizadas representa el límite de fases del sistema corindón — material de enlace en fusión, detallando paso a paso la micromorfología del enlace cerámico así creado (figuras 53—90).

Se comprende bien la importancia de la documentación detallada por la importancia y novedad del campo.

La otra parte analiza el componente de la impureza de aluminato de sodio del corindón preparado a base de alúmina, señalando que la presencia de las impurezas juega un papel importante en la elaboración del material correspondiente a una calidad determinada.

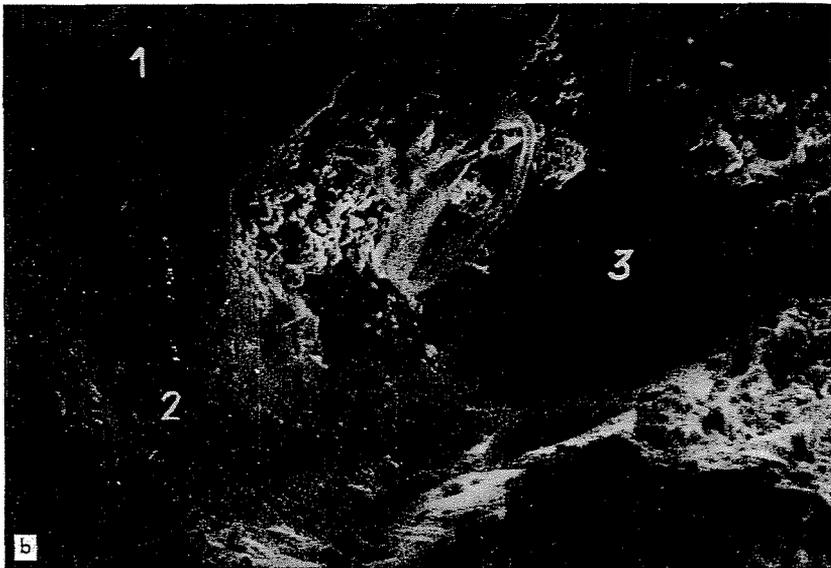
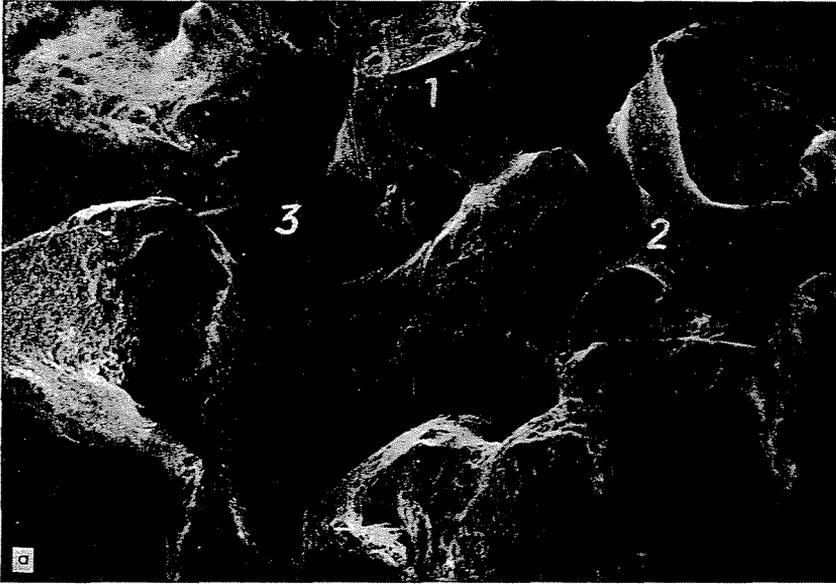
### Resumen de las investigaciones científicas

#### 1. Textura de las piedras de esmeril

1.1. Las figuras 1 y 2 presentan la textura de la piedra de esmeril constituida por las partículas esmeriladoras, el material de enlace y por los poros. También nos da a conocer la manera de acomodarse de las partículas esmerila-



*Fig. 1.* Estructura de las piedras de esmeril con enlace cerámico presentado en una exposición hecha a 60 aumentos con el microscopio óptico (1 partícula de electrocorindón cubierta por el material de enlace, 2 puente del material de enlace cerámico, 3 poro de aire)



**Fig. 2.** Estructura de las piedras esmeriladoras con partículas de corindón y enlace cerámico, mostrada mediante el microscopio electrónico de tipo scanning (1 partícula de electrocorindón cubierta por el material de enlace, 2 puente del material de enlace, 3 poro de aire)  
a) (100×)  
b) (900×)

doras cubiertas por el material de enlace y que se conectan entre sí por puentes de dicho material. La textura de dichas piedras de esmeril varía según el tipo de la partícula esmeriladora (por ejemplo óxido de aluminio, carburo de silicio, etc.) y según el material de enlace utilizado. En las piedras de esmeril fabricadas con una tecnología moderna e integradas por partículas esmeriladoras casi isométricas, el material de enlace fija a las partículas esmeriladoras en grupos de a seis (datos empíricos de *Kingery*).

1.2. La forma de los puentes del material de enlace entre las partículas esmeriladoras de óxido de aluminio es hiperbólica, en casos ideales, forma que en la práctica difiere un poco más o menos. La forma y las dimensiones de los

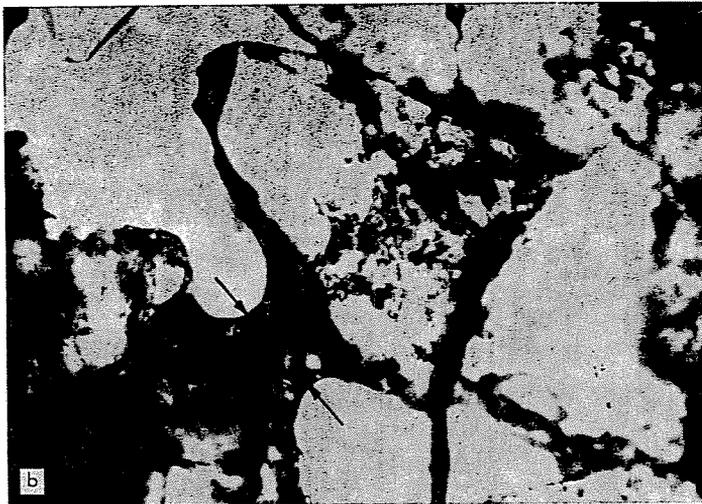
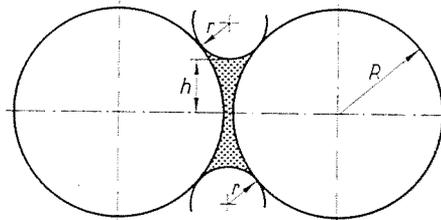
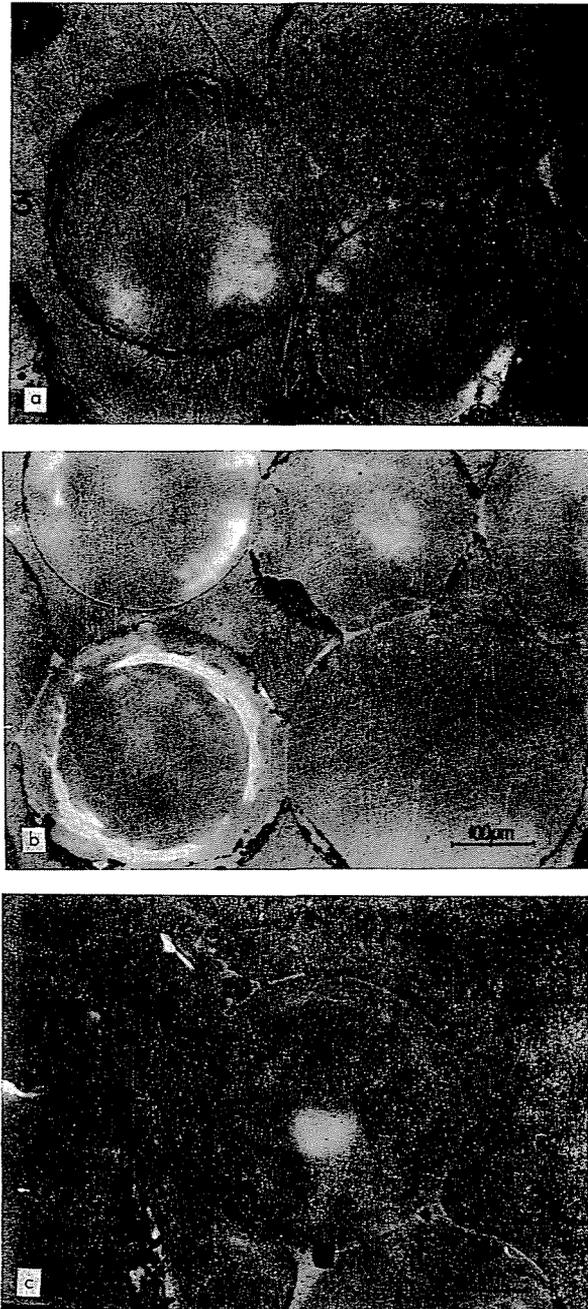


Fig. 3. a) Puente en fusión que enlaza partículas idealizadas de forma esférica  
b) puente del material de enlace cerámico de forma idealizada (250 ×)

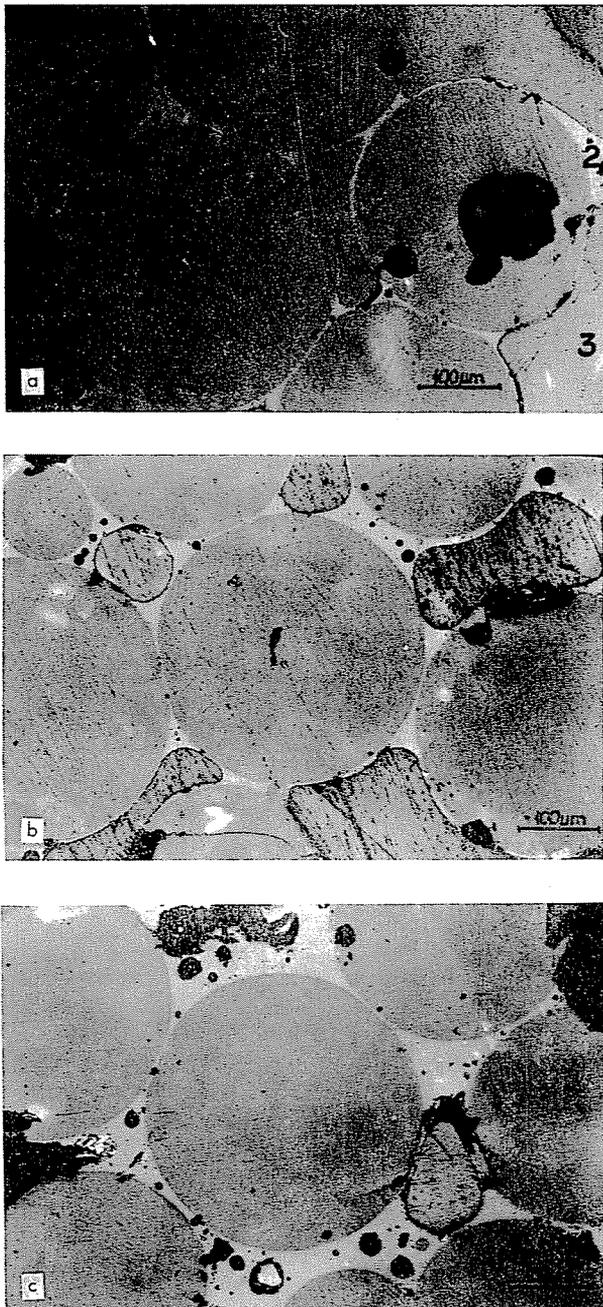
puentes del material de enlace se caracterizan por el radio del cuello representado por „h” y por el radio de la superficie del cuello por „r” (figura 3.).

1.3. Las propiedades y la formación de los distintos tipos de textura de las piedras de esmeril integradas por partículas de óxido de aluminio, se pueden estudiar en modelos formados por esferas de vidrio y materiales de



*Fig. 4.* Formación de los tipos estructurales en función de la cantidad del material de enlace  
(1 esfera de vidrio, 2 puente del material de enlace, 3 resina fijadora)

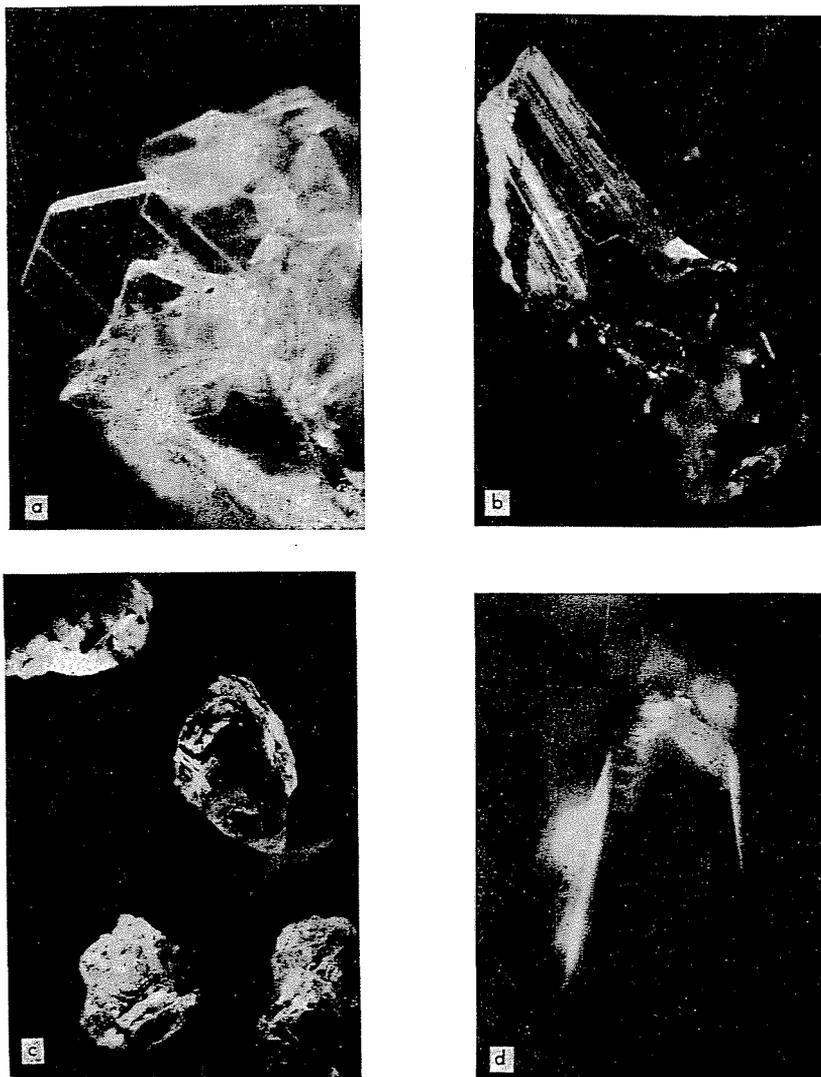
- a) 2% de material de enlace
- b) 6% de material de enlace
- c) 12% de material de enlace



*Fig. 5. Formación de los tipos estructurales en función de la cantidad del material de enlace (1 esfera de vidrio, 2 puente del material de enlace, 3 resina fijadora)*  
a) 16% de material de enlace  
b) 28% de material de enlace  
c) 30% de material de enlace

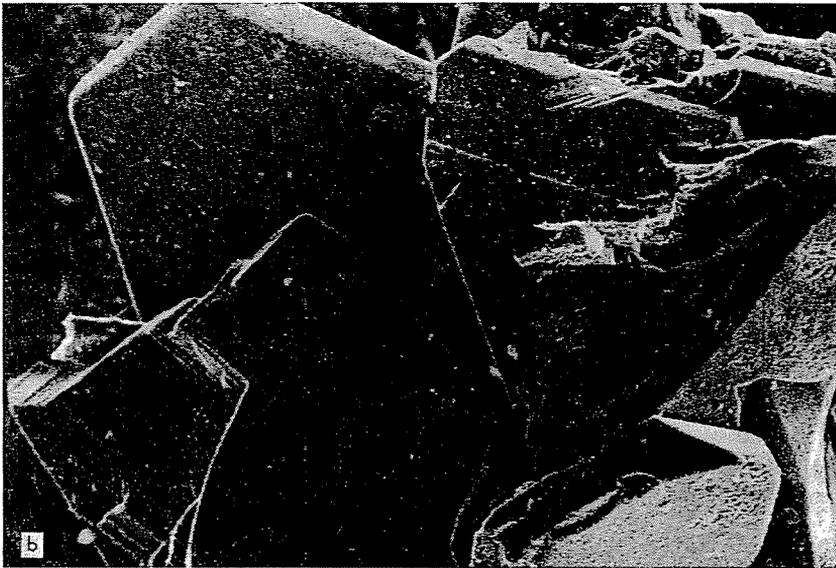
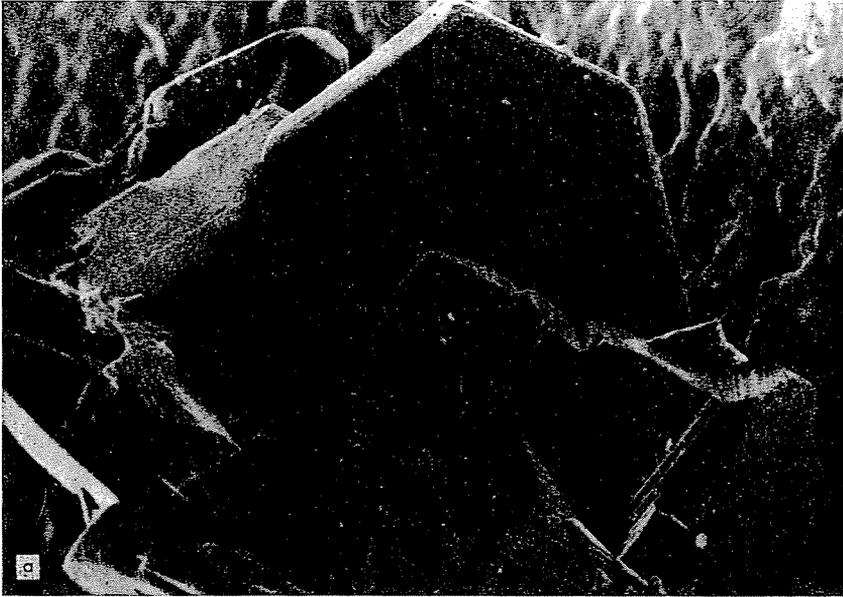
enlace de fácil fusión. Las figuras 4 y 5 demuestran tres tipos de texturas que se forman al elevar el contenido del material de enlace del 2 al 30%.

1.4. En el caso de utilizar del 2 al 8% de contenido del material de enlace, apenas se puede detectar bajo el microscopio óptico la envoltura del material de enlace, puesto que la mayor parte de este se encuentra formando puentes



*Fig. 6.* Vistas de los tipos de forma de las partículas de electrocorindón tomadas bajo microscopio óptico

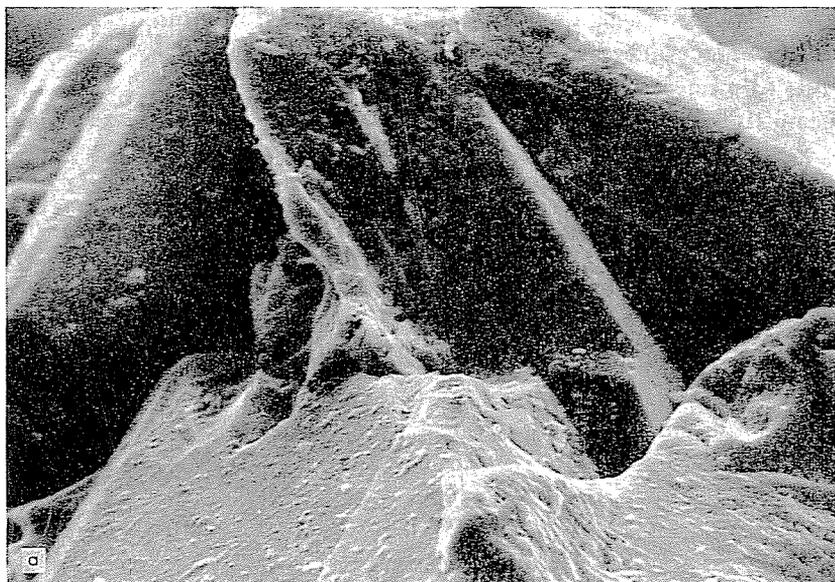
- a) Electrocorindón policristalino con un cristal bien desarrollado (150×)
- b) electrocorindón de forma alargada (130×)
- c) partícula de electrocorindón maciza (130×)
- d) filo cortante característico de la partícula de electrocorindón (100×)



*Fig. 7.* Un cristal bien desarrollado e intacto luego de haber sido triturada una partícula de electrocorindón policristalino (las exposiciones bajo microscopio electrónico de tipo scanning figura 6/a)  
a) (350 ×)  
b) (400 ×)



*Fig. 8.* Estructura de una partícula de electrocorindón policristalino (las exposiciones bajo microscopio electrónico de tipo scanning figura 6/a)  
a) (1200 $\times$ )  
b) (4000 $\times$ )



*Fig. 9.* Estructura de una partícula de electrocorindón policristalino (las exposiciones bajo microscopio electrónico de tipo scanning figura 6/a)  
a) (1200 $\times$ )  
b) (4000 $\times$ )

de enlace entre las esferas de vidrio. En la práctica el mínimo del contenido del material de enlace necesario es de un 8% aproximadamente.

1.5. Al aumentar el contenido del material de enlace del 10 al 28%, las dimensiones de los puentes del material de enlace aumentan gradualmente, a la vez que se hacen cada vez más gruesas las envolturas del material de enlace de las esferas de vidrio.

En la práctica el contenido del material de enlace utilizado es el anteriormente mencionado.

1.6. Al aumentar el contenido del material de enlace sobre el 28% ya se pierde la estructura ordenada. El aumento excesivo del grosor de los puentes del material de enlace, deformaciones parciales de dichos puentes y la incrustación de las esferas de vidrio en el material de enlace, acompañan al aumento del contenido del material de enlace sobre el 28%.

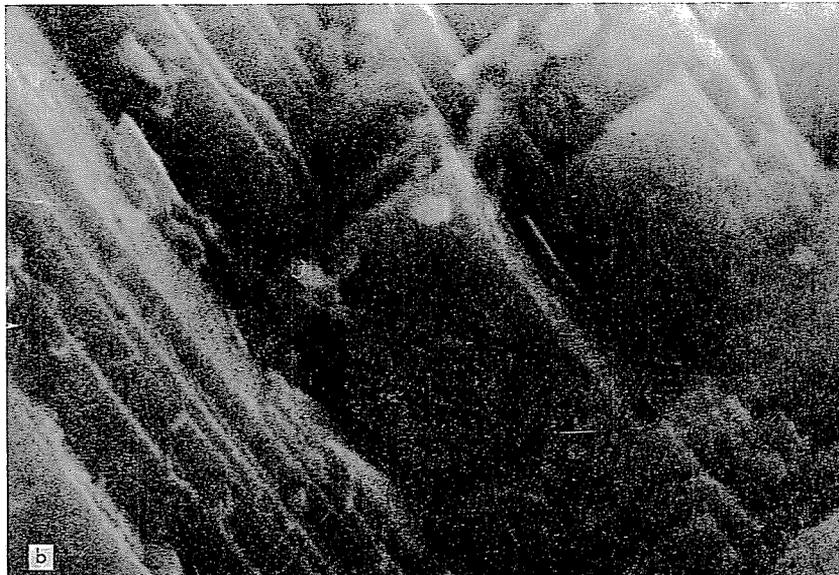
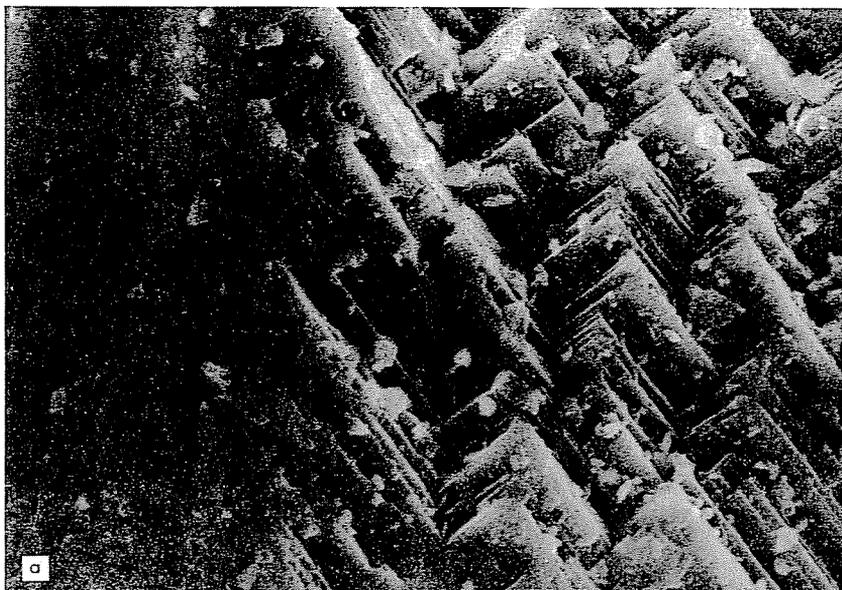
1.7. El modelado de la formación de la textura demostrada brinda valiosos datos para la planificación de los grados de calidad de las piedras de esmeril (proporción del material de enlace y las partículas esmeriladoras, parámetros tecnológicos, etc.).

## 2. Partículas esmeriladoras de óxido de aluminio

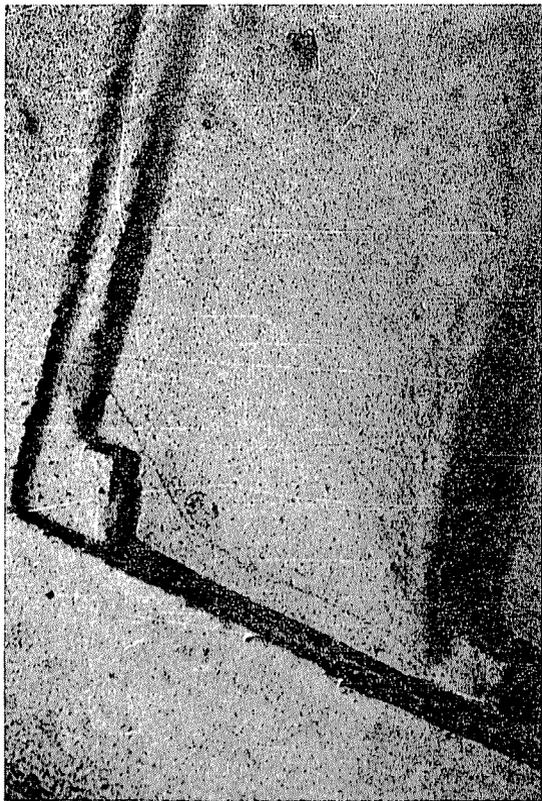
2.1. Las propiedades importantes, desde el punto de vista del enlace, de las *partículas* esmeriladoras y del esmerilado, dependen de numerosos factores, entre otros la forma de las partículas y de su estructura cristalina. Las partículas macizas, pero afiladas, con formas regulares tetraédricas, hexaédricas u octaédricas desgastan el material (esmerilan) en forma pareja, además de esto, constituyen la base de la estructura ordenada de las piedras de esmeril.

2.2. Debido a las condiciones de la fusión de los bloques de óxido de aluminio y de su cristalización, la textura no homogénea de los bloques de corindón, y los conocidos errores en la molienda y clasificación de las partículas, en las fracciones seleccionadas no sólo hay partículas casi isométricas sino que también aparecen partículas planas o con forma de aguja o con la combinación de dichas formas. La separación de las partículas, en la superficie, que a pesar de tener gran importancia se tiene poco en cuenta, juega un papel fundamental durante la formación del enlace en la ubicación y unión del material de enlace en estado de fusión.

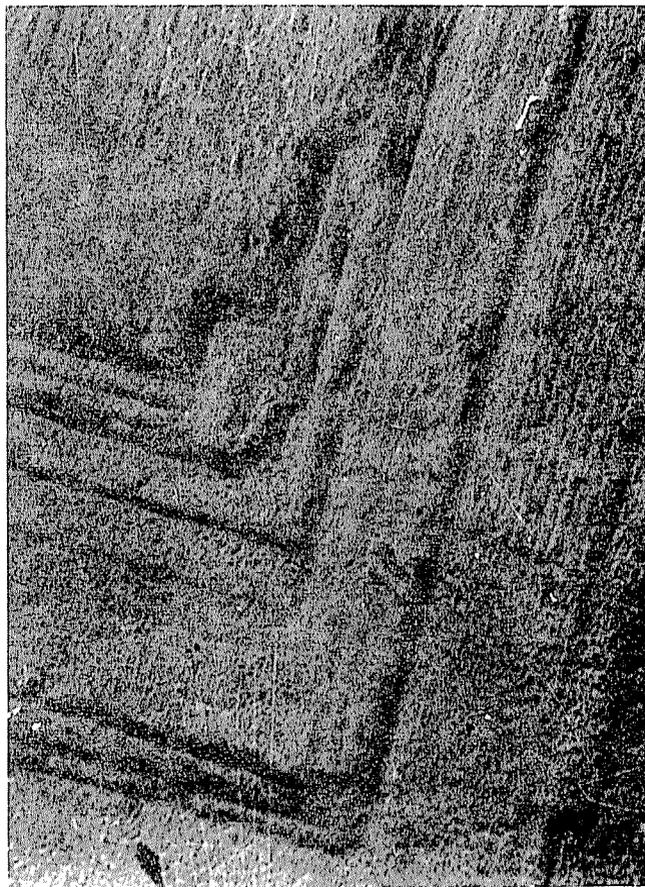
2.3. Las partículas de óxido de aluminio están formadas por microcristales de dimensiones inapreciables bajo el microscopio óptico. Su tamaño, forma y la gran variedad de sus tipos de enlace se presentan en las figuras 10—22.



*Fig. 10.* Agrupaciones microcristalinas de diferente tamaño en el electrocorindón. Exposiciones hechas bajo microscopio electrónico de tipo scanning  
a) (1300 $\times$ )  
b) (13 000 $\times$ )



*Fig. 11.* Ordenamiento horizontal de la superficie del electrocorindón con formaciones laminares ya escalonadas. Exposiciones bajo microscopio electrónico (28 000 $\times$ )



*Fig. 12.* Superficie acanalada de electrocorindón. Exposiciones bajo microscopio electrónico (46 000 $\times$ )



*Fig. 13.* Toma electromicroscópica de la superficie de electrocorindón de estructura prismática vertical (28 000 $\times$ )



*Fig. 14.* Toma electromicroscópica de la superficie de electrocorindón de estructura prismática vertical (28 000 $\times$ )



*Fig. 15.* Agrupaciones microcristalinas de forma laminar unidas mediante material fundido en el electrocorindón. Exposición bajo microscopio electrónico (17 000 $\times$ )



*Fig. 16.* Agrupaciones microcristalinas con diversa orientación y tamaño en el electrocorindón. Exposiciones bajo microscopio electrónico (44 000 $\times$ )



*Fig. 17.* Agrupaciones microcristalinas de diverso tamaño en el electrocorindón. Exposiciones bajo microscopio electrónico (36 000 $\times$ )



*Fig. 18.* Agrupaciones microcristalinas de diverso tamaño en el electrocorindón. Exposiciones bajo microscopio electrónico (21 000 $\times$ )



*Fig. 19.* Agrupaciones microcristalinas de diverso tamaño y variada orientación en el electrocorindón. Exposiciones bajo microscopio electrónico (8000 $\times$ )



*Fig. 20.* Agrupaciones microcristalinas con diversa orientación y tamaño en el electrocorindón. Exposición bajo microscopio electrónico (15 000 $\times$ )

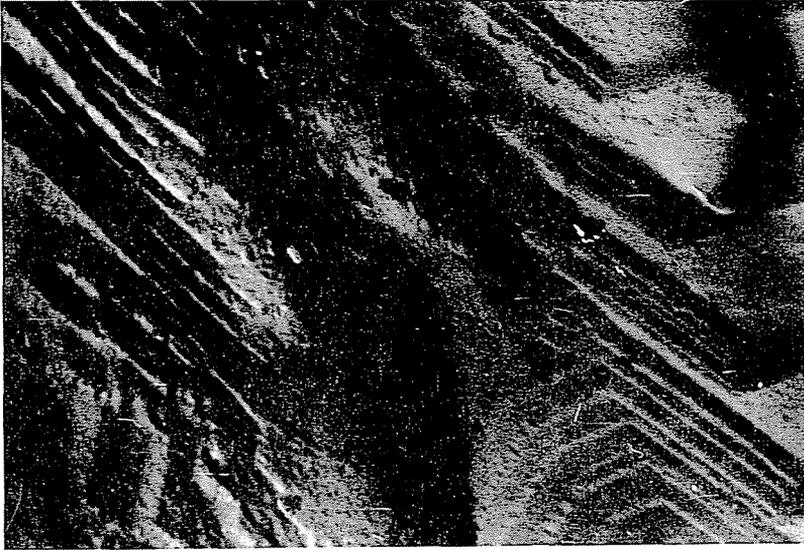


Fig. 21. Agrupaciones microcristalinas de diversa orientación y tamaño ordenadas en forma laminar escalonada y con diferentes tipos de enlace en el electrocorindón. Exposición bajo microscopio electrónico (23 000 $\times$ )

### 3. Las impurezas y los componentes que influyen en las propiedades del corindón preparado

3.1. Los métodos tradicionales del análisis químico no dan el debido punto de referencia sobre el papel que juegan las impurezas y componentes que influyen en las propiedades de las partículas esmeriladoras de corindón. Además de la calidad y cantidad de dichos componentes, es necesario conocer el modo de su distribución y su comportamiento contra las distintas acciones. Durante nuestro trabajo investigativo analizamos minuciosamente al corindón elaborado a partir de la alúmina.

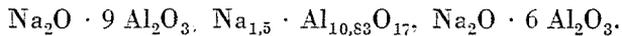
3.2. En el comportamiento del corindón elaborado a partir de la alúmina, influye fundamentalmente como impureza el aluminato de sodio ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot 11 \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $D_{6h}^4 - C_6$  (mmc), denominado con anterioridad y a menudo conocido aún por  $\beta$ -corindón. Este compuesto, en grandes cantidades, y fundamentalmente si se encuentra acumulado en un lugar, ocasiona grandes daños, pues al descomponerse por la acción del calor disminuye la dureza de las partículas esmeriladoras.

El contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  de la alúmina es por lo general de 0,5—1,0%. La estructura cristalina del denominado  $\beta$ -corindón fué determinada en 1931 y ya en ese entonces se dió a conocer que ésta no corresponde a su composición



Fig. 22. Agrupaciones microcristalinas de diversa orientación y tamaño con diferentes tipos de enlace en el corindón puro. Exposiciones bajo microscopio electrónico (10 000 $\times$ )

química. La composición química del llamado  $\beta$ -corindón dada por distintos autores varía mucho, así por ejemplo:



Según otros autores la composición química del aluminato de sodio es la siguiente:  $(1,16+x) \text{Na}_2\text{O} \cdot 11 \text{Al}_2\text{O}_3$  donde  $x$  representa la fracción molar del  $\text{Na}_2\text{O}$  la cual varía desde 0,19 a 0,59. Si ésta es menor que 0,19 entonces se precipita  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  del  $\beta$ -corindón, y si es mayor que 0,59 entonces  $\text{NaAlO}_2$ . Debido a que la composición química del  $\beta$ -corindón no es estequiométrica, los parámetros cristalinos son variables. La dependencia de los parámetros cristalinos en función de la composición química se presenta en la figura 34/a. La descripción exacta de dicha estructura cristalina con composición no estequiométrica no ha sido publicada aún. El diagrama de fase del sistema  $\text{Na}_2\text{O} \cdot$

·  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$  no ha sido descrito aún con exactitud debido a que el estudio de los equilibrios de fase es dificultado por el hecho de que una parte del óxido de sodio abandona el sistema al ser tratado a temperaturas mayores de 900 °C.

Las principales propiedades físicas del aluminato de sodio son:

Densidad g/cm <sup>3</sup>	Dimensiones del cristal elemental Å <sup>o</sup>		Microdureza kgf/mm <sup>2</sup>	Indice de refracción	
	a	c		N <sub>o</sub>	N <sub>e</sub>
3,24	5,584	22,45	1300—1600	1,678	1,635

3.3. Las fotos realizadas con microscopios ópticos y electrónicos, unidas a los análisis de microdureza y a los exámenes realizados mediante la microsonda, demuestran sin lugar a dudas que la ubicación del aluminato de sodio dentro de las partículas de corindón elaborado a partir de la alúmina, no es de forma homogénea sino que éste se encuentra acumulado en diversos lugares de la partícula del llamado electrocorindón noble (alúmina). (Figuras 23., 24.)

3.4. En las exposiciones realizadas mediante el microscopio óptico, basadas en la luz reflejada del corindón, las partes donde se encuentra el aluminato de sodio aparecen como manchas o franjas grises, las cuales presentan una microdureza mucho menor que la del corindón puro que se encuentra a su alrededor. La microdureza de la partícula del electrocorindón noble y cuyo diámetro es de 10  $\mu\text{m}$ , alcanza de 2700 a 2900 kp/mm<sup>2</sup>, mientras que las partículas de aluminato de sodio presentan una microdureza de 2200 a 2400 kp/mm<sup>2</sup>.

3.5. En las exposiciones mediante la microsonda electrónica sobre la topografía y la composición del aluminato de sodio, podemos ver los territorios más separados, los mismos que al analizar mediante el microscopio óptico, observamos que dentro de dichos territorios la distribución del Na—K, según las fotos roentgenográficas, es uniforme. En las figuras 24. y 25. podemos apreciar el proceso que se lleva a cabo al calentar sobre los 900 °C al aluminato de sodio. En este proceso el óxido de sodio se aleja gradualmente del sistema en forma de vapor, transformándose el aluminato de sodio en corindón. Las manchas microscópicas grises que presenta el electrocorindón noble debido a su contenido de aluminato de sodio, desaparecen al ser tratado éste a una temperatura de 1300 °C durante media hora, tomando un intenso color blanco, mientras que la superficie se transforma en porosa. La evaporación del óxido de sodio la demuestran los exámenes con la microsonda.

Las fotos tomadas mediante el microscopio electrónico de las partículas de corindón, parcialmente cubiertas por el material de enlace, muestran la

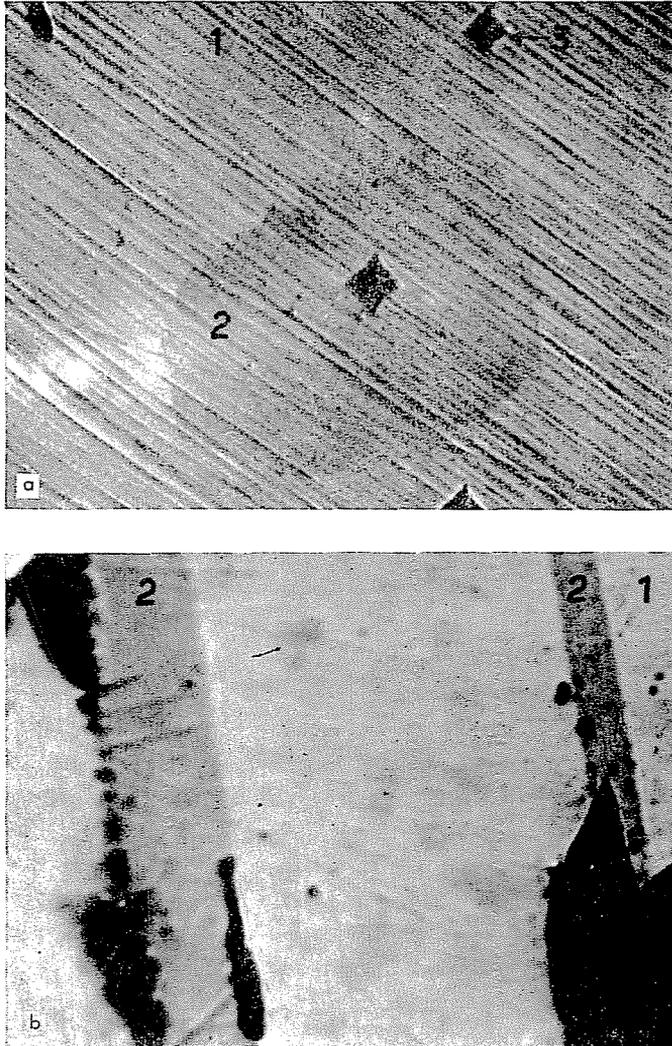
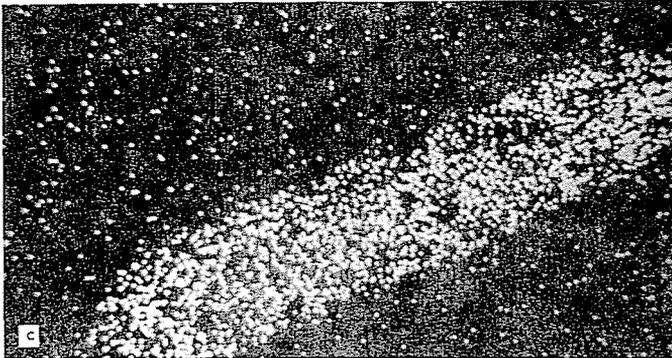
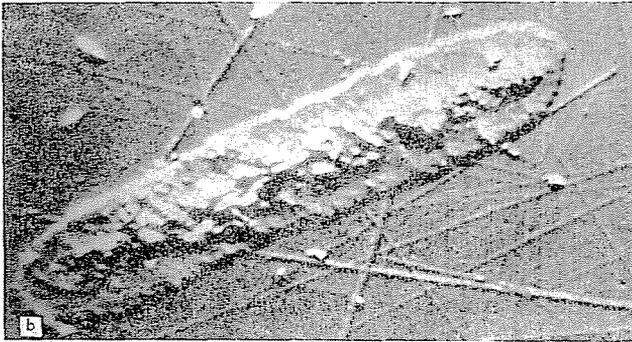
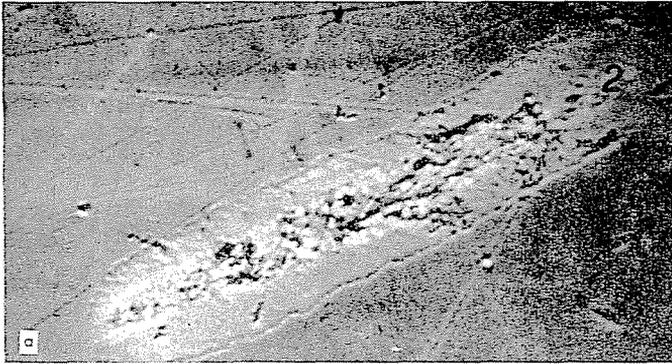


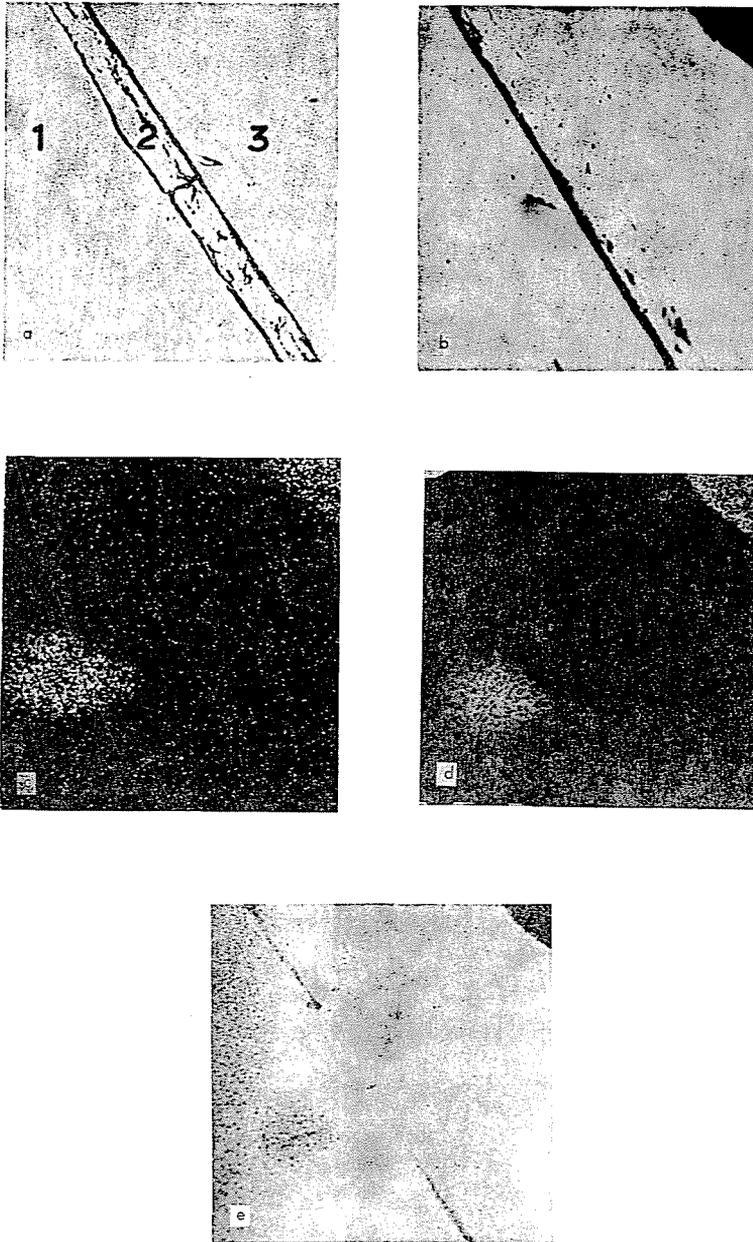
Fig. 23. Impurezas de aluminato de sodio en el electrocorindón 1 electrocorindón, 2 aluminato de sodio, 3 huella de la medición de microdureza  
 a) exposición bajo microscopio óptico (1000×)  
 b) exposición bajo microscopio óptico (650×)

nueva estructura adquirida después del tratamiento térmico de aquellas partes que contienen aluminato de sodio y no entran en contacto con el material de enlace. Sodio y silicio solamente hemos podido encontrar en las gotas de material de enlace como componentes originales.

3.6. El material cerámico de enlace, con toda seguridad influye en la descomposición del aluminato de sodio durante el tratamiento térmico, debido



*Fig. 24.* Impurezas de aluminato de sodio en el electrocorindón presentadas mediante microsonda. (1 electrocorindón 2 aluminato de sodio)  
 a) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos ( $400\times$ )  
 b) Exposición topográfica ( $400\times$ )  
 c) exposición roentgenográfica del Na—K $_{\alpha}$



*Fig. 25.* Lugar de las impurezas de aluminato de sodio del electrocorindón después de un tratamiento térmico de 1300 °C. Exposiciones con microsonda. (1 electrocorindón, 2 impurezas de aluminato de sodio, 3 gota de material de enlace)  
 a) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos (200×)  
 b) exposición topográfica (200×)  
 c) exposición roentgenográfica Na—K<sub>α</sub>  
 d) exposición roentgenográfica Si—K<sub>α</sub>  
 e) exposición roentgenográfica Al—K<sub>α</sub>

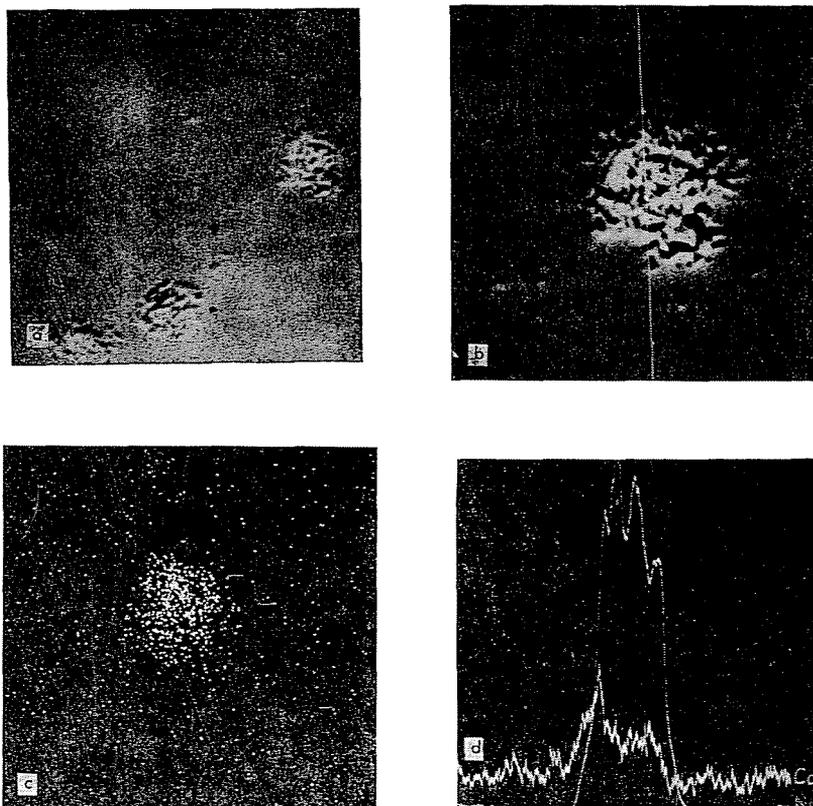


Fig. 26. Dispersión de las impurezas en el electrocorindón. (Exposiciones con microsonda)  
 a) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos (200×)  
 b) exposición topográfica con el lugar de medición de la distribución lineal (420×)  
 c) exposición roentgenográfica del Si-K<sub>α</sub>  
 d) distribución lineal de las impurezas de Ca y Na

a que dicha descomposición no ocurre en la superficie de la partícula de corindón sino debajo de la capa en fusión del material de enlace. En piedras de esmeril enercristalizadas con partículas de electrocorindón y con un material de enlace de tipo que contiene silicato de boro, mediante un tratamiento térmico a temperatura creciente donde tomamos muestras cada 30 minutos y luego de haber detenido el proceso bruscamente y analizado las muestras con métodos roentgenográficos, hemos demostrado que para evitar en mayor grado los efectos dañinos de la descomposición del aluminato de sodio es necesario como mínimo una temperatura de 1250 °C (figura 34/b).

3.7. En el corindón preparado a partir de la alúmina, además del sodio, aparecen como impurezas el silicio, calcio, potasio y hierro, siendo su contenido total en porcentaje, inferior al del sodio (figuras 26—28.).

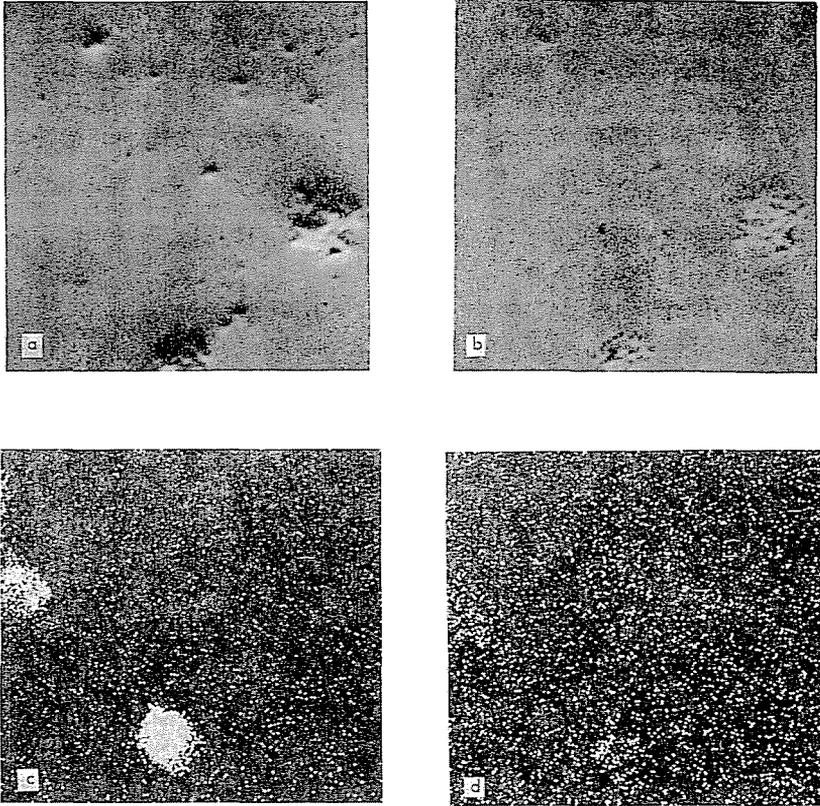


Figura 27. Distribución de las impurezas en el electrocorindón. (Exposiciones con microsonda)

- a) exposición topográfica (200×)
- b) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos (200×)
- c) exposición roentgenográfica del Ca—K<sub>α</sub>
- d) exposición roentgenográfica del Na—K<sub>α</sub>

3.8. El dióxido de circonio mejora la resistencia de las partículas esmeriladoras de electrocorindón frente a las altas temperaturas. Al fundir la bauxita se puede agregar hasta un 40% de dióxido de circonio. El óxido de aluminio y el dióxido de circonio no reaccionan entre sí, ni tampoco se mezclan. En la partícula relativamente nueva, integrada por estos dos componentes, podemos encontrar generalmente los siguientes elementos: hafnio, silicio, titanio, cromo, hierro, calcio y fósforo (figuras 29. a 31.).

3.9. Las propiedades del electrocorindón preparado a partir de la bauxita, las determina la gran variedad de compuestos que se encuentran de un 2 a un 8% como materiales de aleación. Los corindones normales examinados, presentaron los siguientes componentes que modificaron sus características: titanio, hierro, manganeso, silicio y magnesio (figuras 32., 33.).

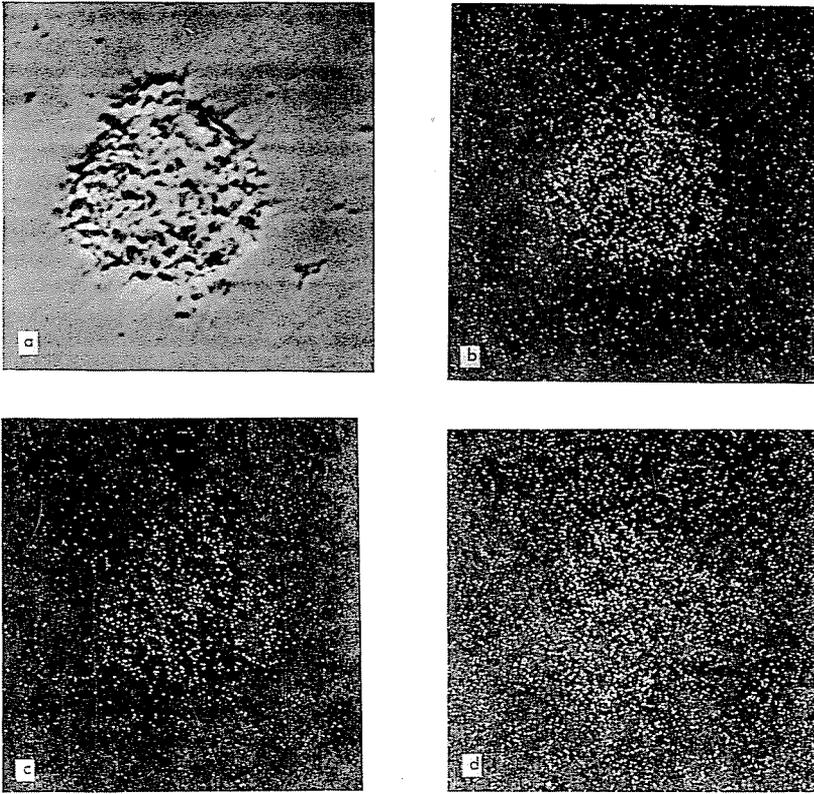


Fig. 28. Distribución de las impurezas en el electrocorindón. (Exposiciones con microsonda)  
 a) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos ( $400\times$ )  
 b) exposición roentgenográfica del  $K-K_{\alpha}$   
 c) exposición roentgenográfica del  $Fe-K_{\alpha}$   
 d) exposición roentgenográfica del  $Na-K_{\alpha}$

#### 4. Caracterización general del enlace cerámico

4.1. El enlace cerámico de las piedras de esmeril aparece definido en la bibliografía como un silicato amorfo, el cual por su composición y propiedades se puede comparar con una masa elástica. Nuestros exámenes fueron orientados hacia dos composiciones minerales típicas no definidas a cabalidad y hacia un material de enlace moderno:

4.1.1. Illites, compuesto por una mezcla de feldespato, arcilla y de illites con partículas menores de  $60\ \mu\text{m}$ .

4.1.2. Illites modificado (la mezcla anterior molida a partículas menores de  $2\ \mu\text{m}$ ).

4.1.3. Encristalizado (sus propiedades las determina el encristalizado preparado del feldespato y del bórax).

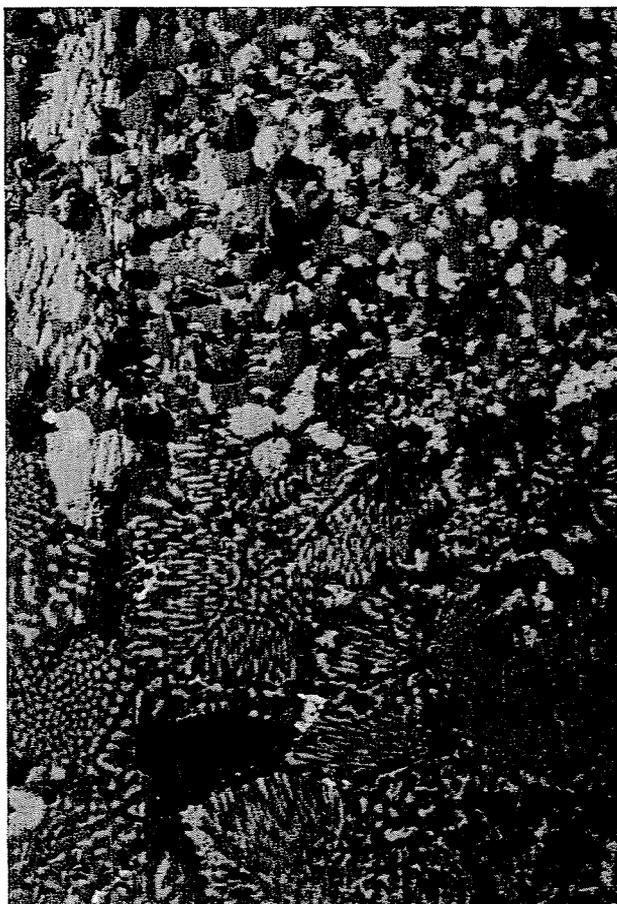
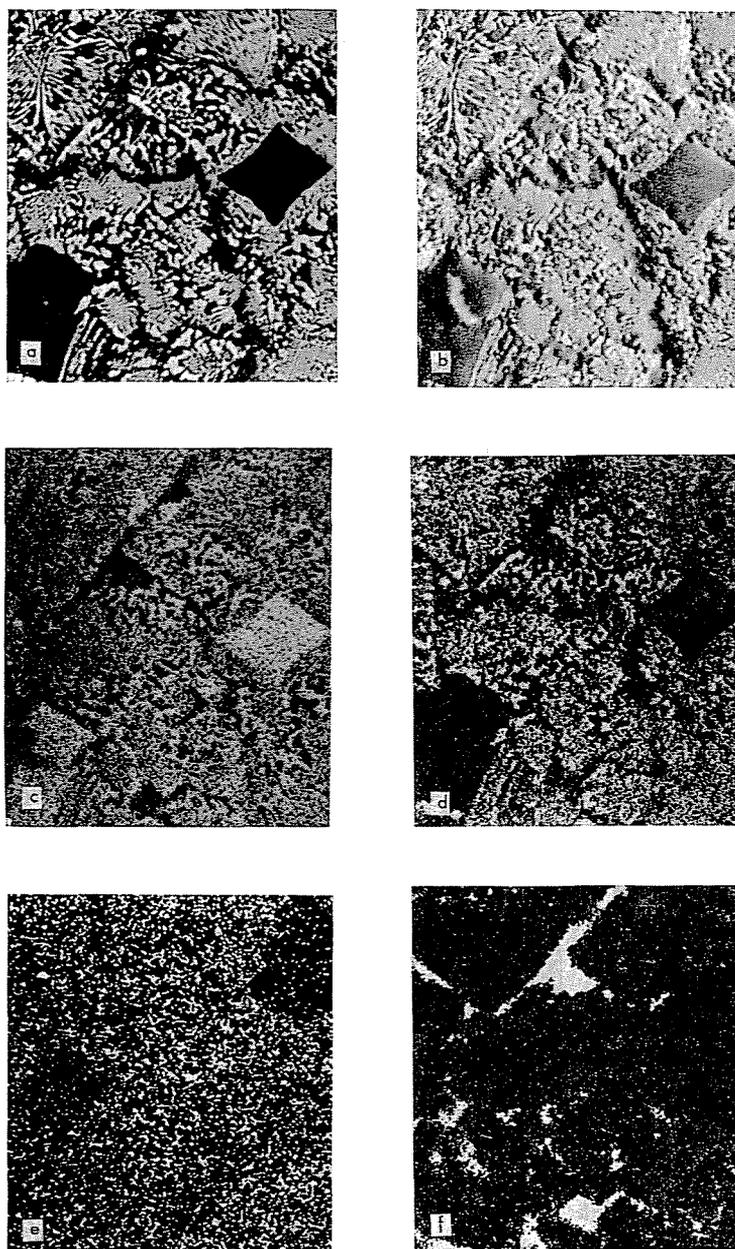


Fig. 29. Estructura de la partícula de corindón con contenido del dióxido de circonio vista al microscopio óptico (1000×)

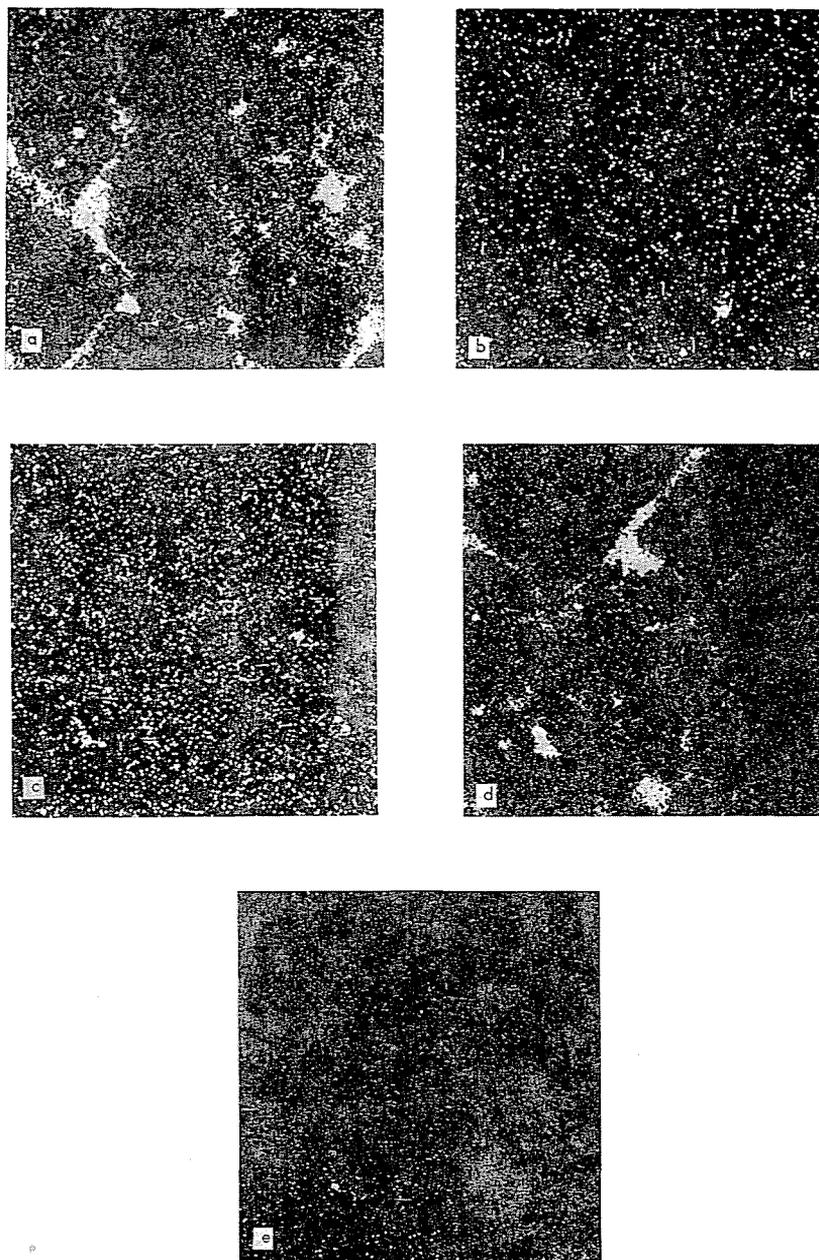
4.2. Debido a que las propiedades químicas y mineralógicas de la arcilla varían en forma no controlable, este tipo de material no es utilizable en la fabricación de productos con propiedades definidas que se puedan reproducir, razón por la que nuestras experiencias detalladas las realizamos con material de enlace encristalizado de calidad reproducible.

La iniciación y el avance del proceso de enlace durante la cocción, se puede observar con grandes resultados mediante los métodos roentgenográficos y exámenes de dureza. Las muestras de las piedras de esmeril las calentamos gradualmente hasta 1300 °C, temperatura óptima encontrada en el caso dado, y tomamos muestras cada 30 minutos; examinando en las mismas la dureza y la composición de sus fases hemos determinado que:



**Fig. 30.** Estructura de la partícula de corindón con contenido de dióxido de circonio examinada con microsonda

- a) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos ( $200\times$ )
- b) exposición topográfica ( $200\times$ )
- c) exposición roentgenográfica del  $\text{Al}-\text{K}_\alpha$
- d) exposición roentgenográfica del  $\text{Zr}-\text{L}_\alpha$
- e) exposición roentgenográfica del  $\text{Hf}-\text{L}_\alpha$
- f) exposición roentgenográfica del  $\text{Si}-\text{K}_\alpha$



*Fig. 31.* Estructura de la partícula de corindón con contenido de dióxido de circonio examinada con microsonda (presenta una zona igual que el de la figura anterior)

- a) exposición roentgenográfica del  $\text{Ti}-\text{K}_\alpha$
- b) exposición roentgenográfica del  $\text{Cr}-\text{K}_\alpha$
- c) exposición roentgenográfica del  $\text{Fe}-\text{K}_\alpha$
- d) exposición roentgenográfica del  $\text{Ca}-\text{K}_\alpha$
- e) exposición roentgenográfica del  $\text{P}-\text{K}_\alpha$

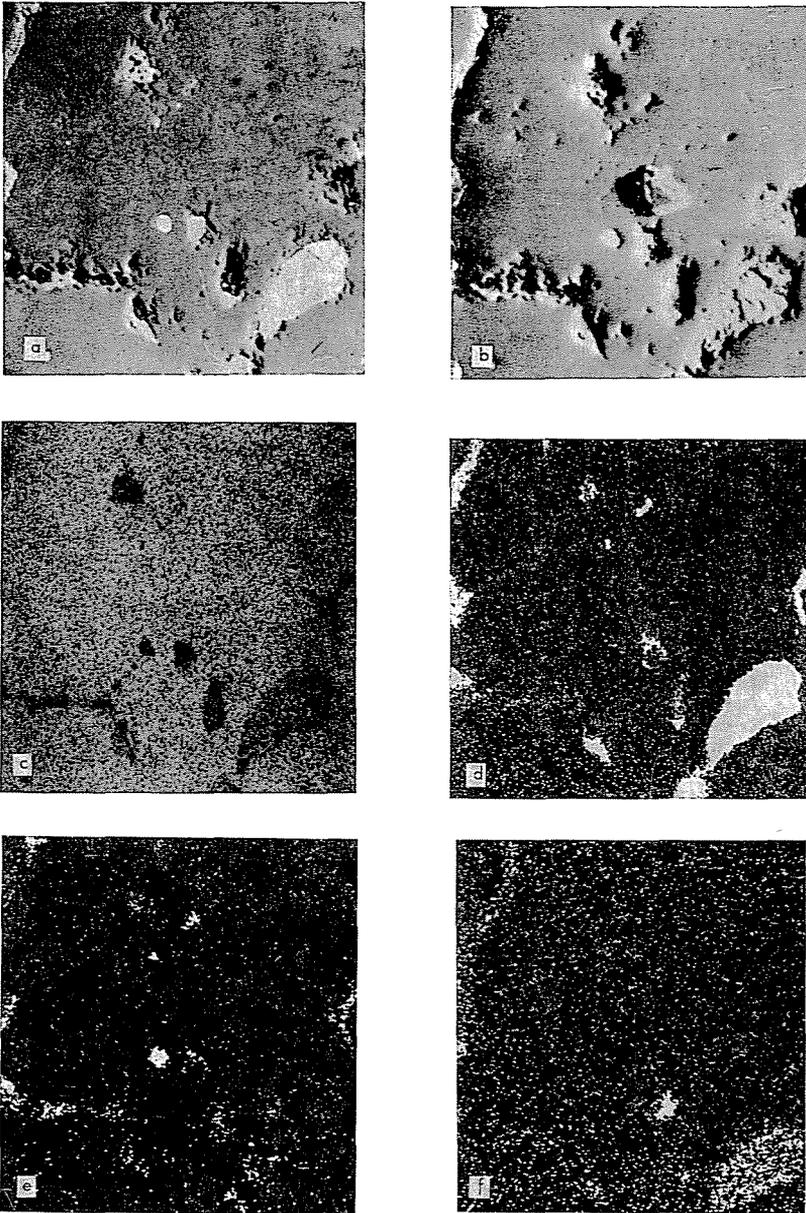
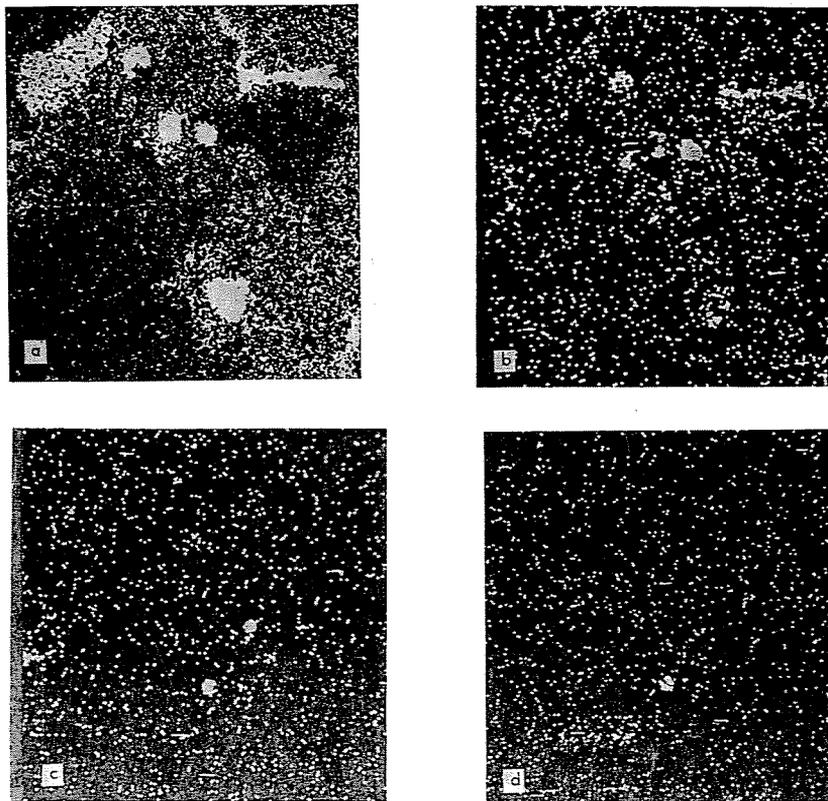


Fig. 32. Distribución de las impurezas y de las sustancias que modifican las propiedades del electrocorindón normal (corindón elaborado a partir de la bauxita). Exposiciones con microsonda

- a) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos (200×)
- b) exposición topográfica (200×)
- c) exposición roentgenográfica del  $\text{Al}-\text{K}_\alpha$
- d) exposición roentgenográfica del  $\text{Ca}-\text{K}_\alpha$
- e) exposición roentgenográfica del  $\text{Si}-\text{K}_\alpha$
- f) exposición roentgenográfica del  $\text{Mg}-\text{K}_\alpha$



*Fig. 33.* Distribución de las impurezas y de las sustancias que modifican las propiedades de corindón (zona igual a la de la figura 32)  
 a) exposición roentgenográfica del  $\text{Ti}-\text{K}_\alpha$   
 b) exposición roentgenográfica del  $\text{Fe}-\text{K}_\alpha$   
 c) exposición roentgenográfica del  $\text{Mn}-\text{K}_\alpha$   
 d) exposición roentgenográfica del  $\text{Cr}-\text{K}_\alpha$

4.3. Los componentes cristalinos del material de enlace se transforman gradualmente en una estructura roentgeno-amorfa. Al final de este proceso prácticamente sólo quedan los picos producidos por el corindón (figura 35/a, los valores marcados con un círculo).

4.4. Los distintos tipos del material de enlace se transforman en enlace sólido con tratamiento térmico diferente (figura 34/b).

4.5. Durante la fabricación de las piedras de esmeril (cocción) en el límite de fase de las partículas de electrocorindón y el material de enlace, surge una tercera fase. Esta tercera fase difiere en sus propiedades y composición de las dos primeras, siendo una fase de transición. Esta fase es propiamente la capa de enlace cuyas propiedades son determinadas por la calidad de los elementos que reaccionan durante la cocción y por la tecnología de cocción utilizada.

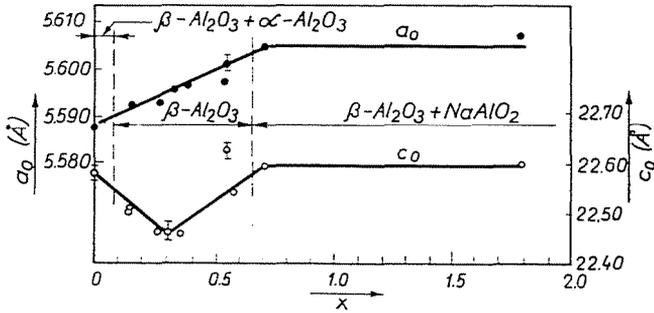
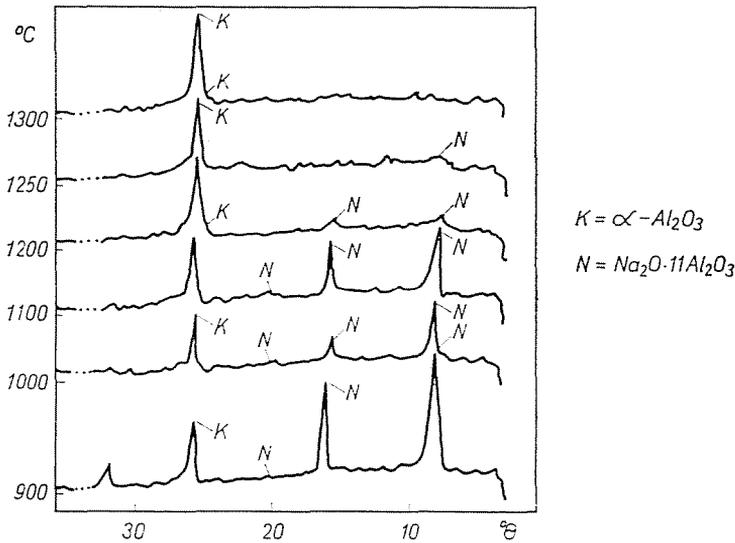


Fig. 34. a) Variación de la constante celdilla unidad del cristal de  $\beta$ -corindón en función de la composición química.



b) Exposición roentgendifractométrica de las piedras de esmeril con material de enlace cerámico vidreado con contenido de silicato de boro después de la cocción

4.6. Para determinar en forma global los componentes fundamentales de la partícula esmeriladora y el material de enlace como el aluminio, el silicio y el potasio, en los alrededores del límite de dichas fases, es utilizable el micro-sondaje de la distribución lineal. El aluminio, fuera del corindón, en el material de enlace apenas se encuentra; sin embargo, el silicio y el potasio solamente forman parte del material de enlace. En la figura 36 podemos apreciar que en el límite de fases de la partícula de electrocorindón y del material de enlace, la concentración del aluminio disminuye bruscamente, mientras que la de silicio y de potasio aumenta.



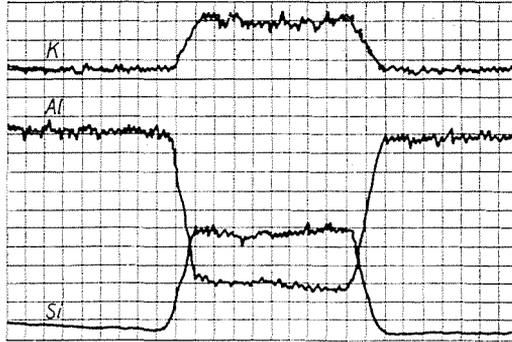
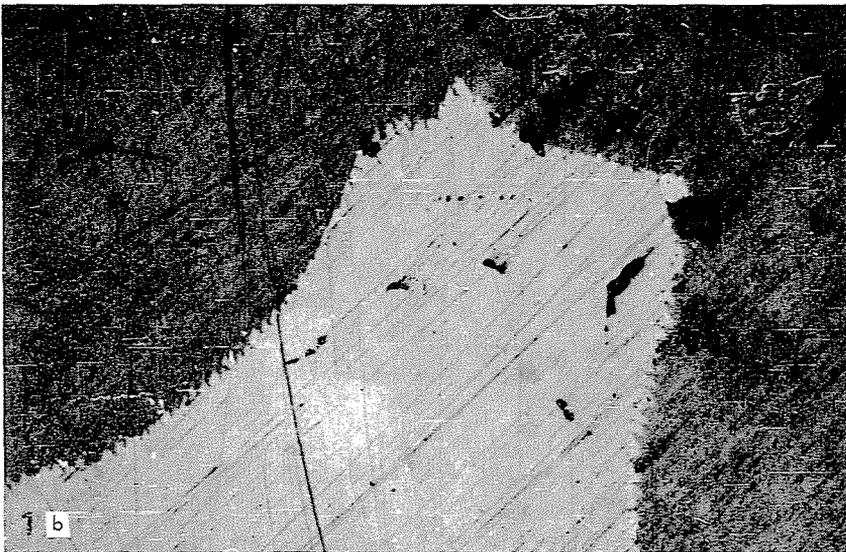


Fig. 36. Distribución lineal del contenido de Al, Si y K de las piedras de esmeril de electrocorindón con enlace cerámico, en el siguiente orden: partícula de electrocorindón — material de enlace — partícula de electrocorindón

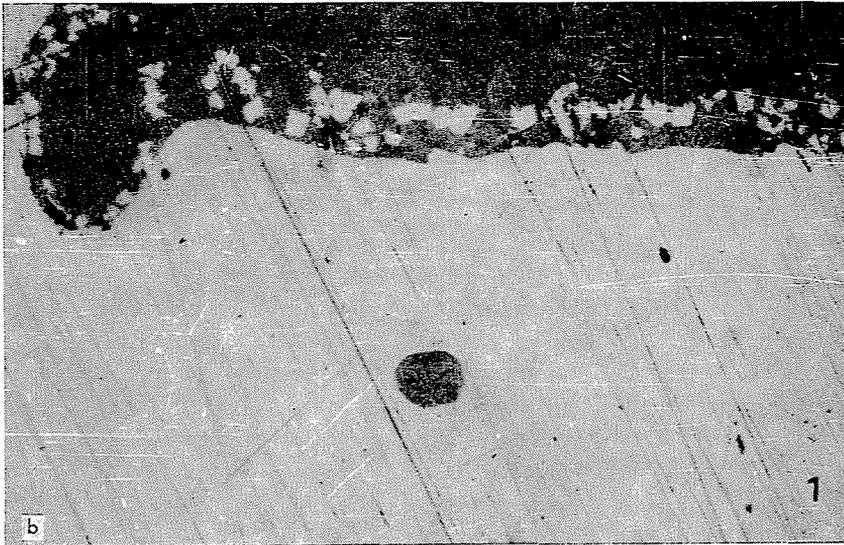
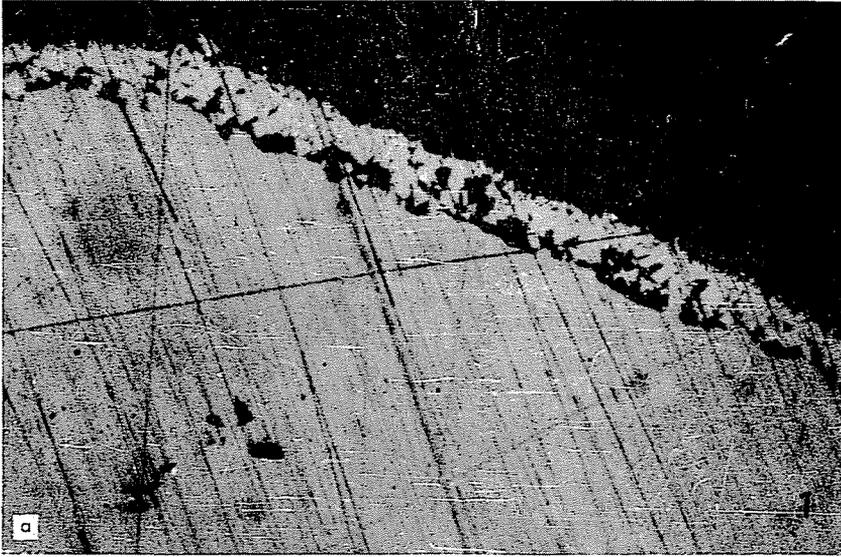
análisis se realizaron en la superficie de la muestra en una línea de  $200\ \mu\text{m}$  de largo). Estos exámenes se realizaron en forma de pruebas; en el capítulo 5. aparecen sus resultados en una forma más desarrollada.

4.7. Durante la cocción de las piedras de esmeril se genera una capa de transición, generalmente de  $10\ \mu\text{m}$  de espesor, entre el material de enlace y el electrocorindón. Esta capa, debido a procesos químicos-físicos, presenta un comportamiento óptico diferente. En la figura 37/a se puede apreciar una muestra examinada mediante el microscopio óptico y que presenta gráficamente la capa de transición entre el material de enlace y las partículas esmeriladoras, dependiente aún de la partícula de corindón pero que en su microtextura ya se diferencia de ésta. La figura 37/b muestra el límite de esta capa con el material de enlace, la cual ya no presenta una forma continua sino que se transforma separándose sus capas. Tales materiales de enlace con un poder de reacción extremo, no se utilizan en la práctica, y el proceso de enlace, aunque en forma exagerada, lo representan gráficamente. Durante la cocción a altas temperaturas reaccionan intensivamente los materiales de enlace con la partícula de corindón; y en el período de la temperatura máxima, en el material de enlace, en dependencia de su viscosidad, “nadan” alejándose del electrocorindón, los microcristales y partículas de corindón desprendidos de la superficie de éste, a distintas distancias de él (figura 38.). Las partículas de corindón desprendidas del electrocorindón, se trasladan hacia el material de enlace en fusión y se ubican en él (figura 39.)

La utilización de modernos materiales de enlace usados también en la industria, con condiciones de cocción regulares, no provoca desprendimientos fuertes en la superficie del corindón por no reaccionar éste de una forma tan fuerte con las partículas de corindón, siendo éste un proceso más moderado donde las partículas de corindón desprendidas de él, no llegan a migrar hacia



*Fig. 37.* Exposición bajo microscopio óptico de las cercanías del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace cerámico (2)  
a) (550×)  
b) (500×)



**Fig. 38.** Exposiciones bajo microscopio óptico de las cercanías del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace cerámico (2)  
a) (550×)  
b) (550×)

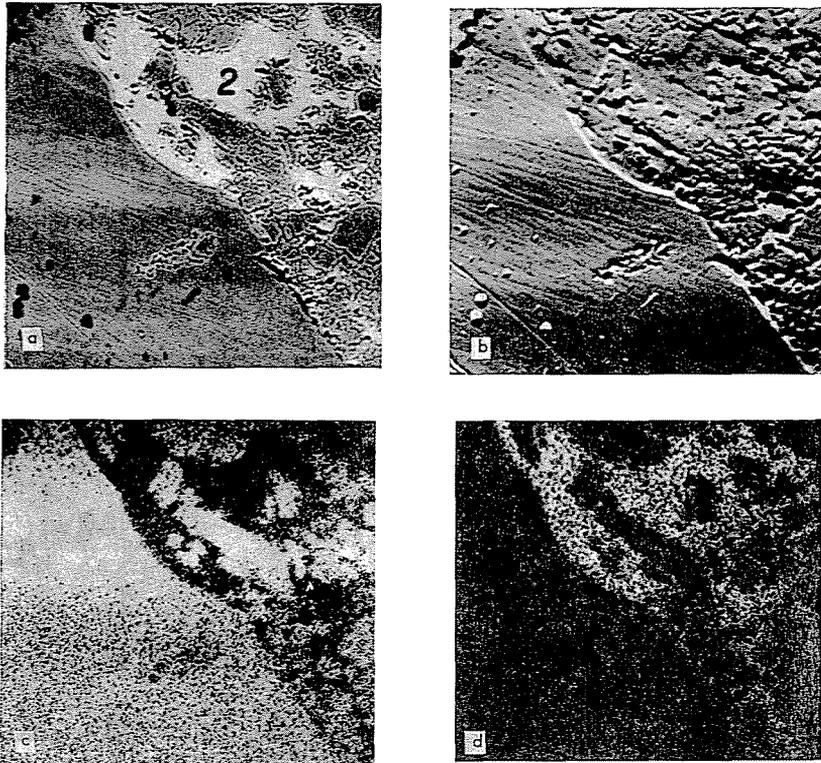


Fig. 39. Exposiciones con microsonda electrónica de las cercanías del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace cerámico (2)  
 a) distribución de la intensidad de los rayos electrónicos ( $200\times$ )  
 b) exposición topográfica ( $200\times$ )  
 c) exposición roentgenográfica del Al -  $K_{\alpha}$   
 d) exposición roentgenográfica del Si -  $K_{\alpha}$

el interior de la fase del material de enlace (vea el capítulo 5). Sin embargo, en ambos casos, durante el proceso de cocción, el contenido de  $Al_2O_3$  del material de enlace crece en tal grado que la temperatura a la que comienza a ablandarse o deformarse dicho material, aumenta en varios cientos de grados. Este factor explica que piedras de esmeril con un material de enlace que pierde su forma a los  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , se pueden tratar a temperaturas de  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  sin correr el riesgo de la deformación.

La figura 40. muestra las características propias de la capa de enlace, mediante fotos tomadas utilizando la técnica de luminiscencia catódica.

4.8. Al examinar, mediante el microscopio electrónico de scanning, nuestras muestras de pedazos de la superficie de piedras de esmeril, podemos observar en forma plástica la estructura y el tipo de enlace entre las partículas esmeriladoras y el material de enlace. Al aumentar el tiempo de cocción,

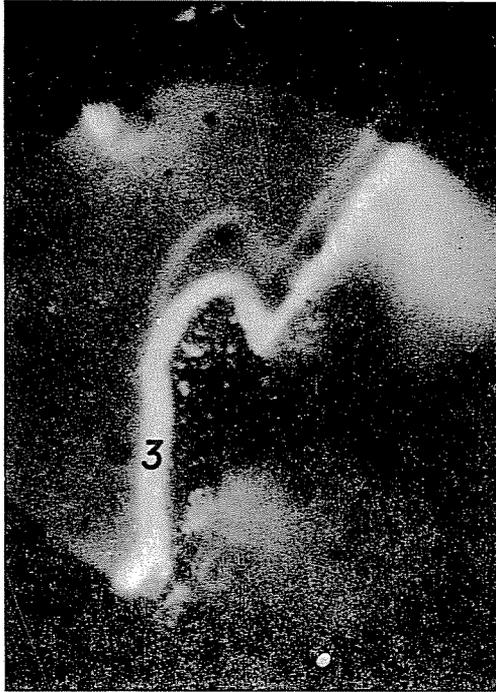


Fig. 40. Exposición luminescencia catódica del límite de fase (3) entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro (2) (500×)

aumenta la anchura de la capa de enlace. Las propiedades de refracción de dicha capa, difieren visiblemente de las propiedades de las otras dos fases “puras” en cuanto a su comportamiento. Esta capa, de propiedades estructurales diferenciadas, influye en el desprendimiento de las partículas de corindón de la superficie de las piedras esmeriladoras, por lo tanto puede modificar o regular el proceso de autoafilamiento de dichas partículas (figuras 41—49).

##### 5. Influencia mutua entre las partículas de electrocorindón y el material de enlace de tipo encristalizado con silicato de boro en fusión durante el proceso de cocción

(Variaciones ocurridas cerca del límite de fases en lo referente a la morfología y estructura de éstas al llevarse a cabo el proceso de enlace a altas temperaturas.)

Para alcanzar el objetivo señalado en el título del presente capítulo realizamos experiencias modelos. Los materiales modelos fueron los mismos que se utilizaron en la fabricación de piedras de esmeril, pero las condiciones de fabricación fueron más reguladas. Por el momento, los procesos que ocurren entre la fase en fusión y la fase sólida durante la cocción, son examinados con mejor resultado con ayuda de la microsonda. Ajustándonos a la preparación



*Fig. 41.* Exposición bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro en fusión (2) (1500 $\times$ ),

de las muestras para el análisis mediante la microsonda y para poder obtener muestras fieles, no hemos utilizado un gran número de muestras preparadas de pequeñas partículas esmeriladoras, sino que hemos hecho reaccionar en cada caso una partícula esmeriladora grande. Para evitar las posibilidades de error y la inseguridad de las reacciones previas entre los componentes del material de enlace, hemos analizado las reacciones del material de enlace completamente fundido a temperaturas correspondientes a la temperatura máxima de cocción.

Los materiales modelos y las condiciones de los exámenes fueron:

La formación del enlace cerámico y el estudio de la microestructura la llevamos a cabo con la ayuda de las siguientes reacciones modelo: **En un horno eléctrico, en una bandeja de platina, hicimos reaccionar el material de**

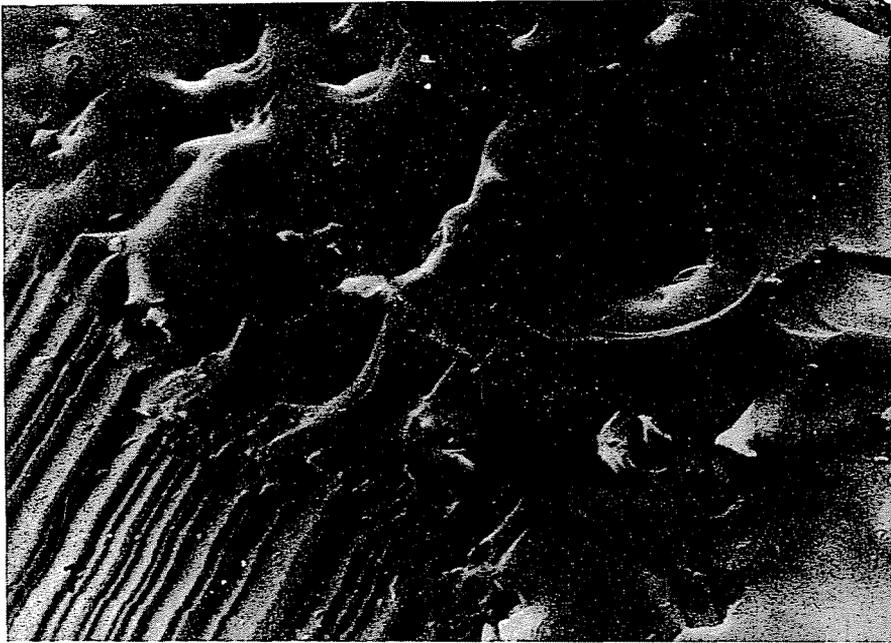


Fig. 42. Exposición bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro en fusión (2) (5000 $\times$ )



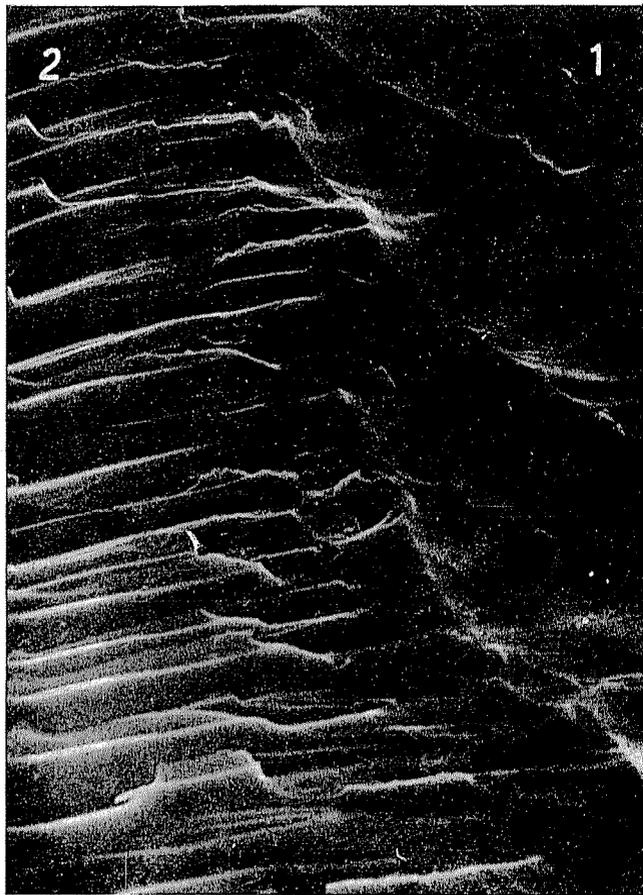
Fig. 43. Exposición bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace con silicato de boro en fusión (2) (15 000 $\times$ )



*Fig. 44.* Exposición bajo el microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace silicato de boro en fusión (2) (6000 $\times$ )



*Fig. 45.* Exposición bajo el microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro en fusión (2) (1500 $\times$ )



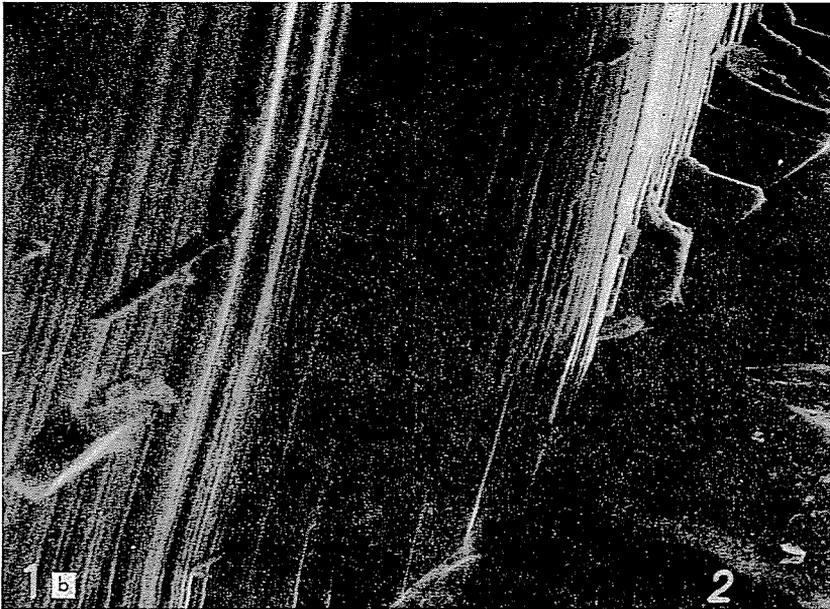
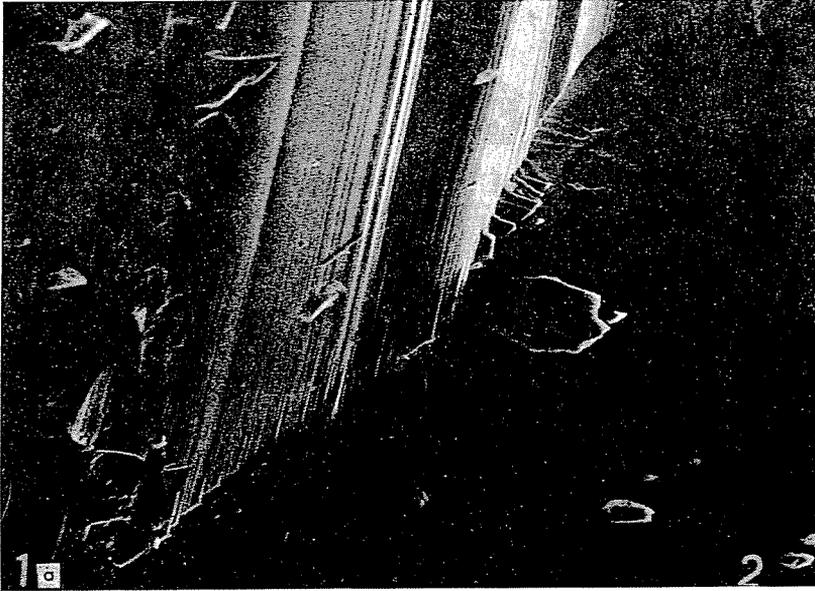
*Fig. 46.* Exposición bajo el microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro en fusión (2) (4500×)



*Fig. 47.* Exposición bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro en fusión (2) (6000×)



Fig. 48. Exposiciones bajo el microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro en fusión (2)  
a) (400×)  
b) (1300×)



*Fig. 49.* Exposiciones bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de silicato de boro en fusión (2)  
a) (500×)  
b) (1500×)

enlace basado en silicato de boro, calentado a 1300 °C y encontrándose en fusión, con las partículas de electrocorindón que se encontraban en iguales condiciones. La reacción la llevamos a cabo durante 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 30, 40, 50, 55, 60, 80, 100, 160 y 240 minutos.

Luego de congelar la reacción analizamos mediante la microsonda y el microscopio electrónico el sistema corindón—material de enlace en fusión, en lo referente a su composición química, y los cambios ocurridos en los límites de fases, en lo referente a su microestructura. Con el objetivo de estudiar a grandes rasgos la relación existente entre la estructura formada dentro de las fases y las propiedades mecánicas de las piedras de esmeril, preparamos cilindros con una composición de las sustancias modelos de un 85% de electrocorindón y un 15% de material de enlace; dichos cilindros presentan perforaciones de  $50 \times 10 \times 15$  mm. A estas muestras le dimos un tratamiento térmico igual y por el mismo espacio de tiempo, que a los exámenes modelos. A los cuerpos así tratados les examinamos la formación del módulo de elasticidad.

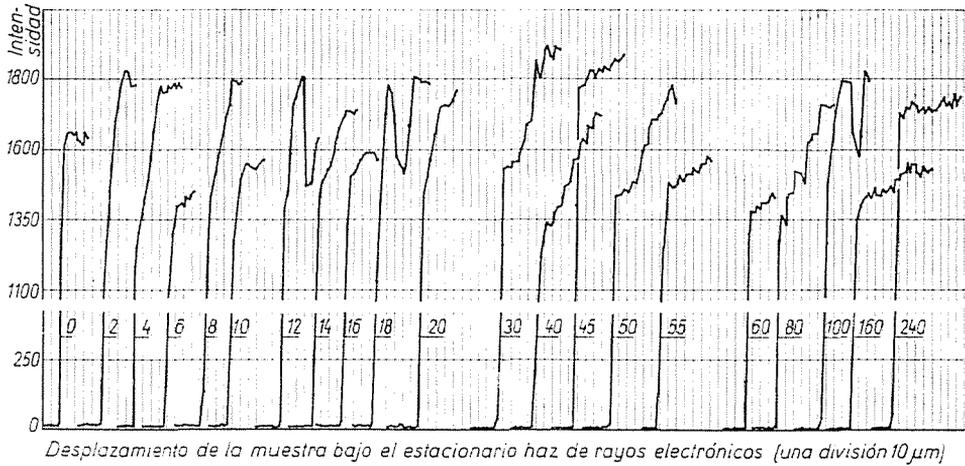
Durante las mediciones realizadas con la microsonda, analizamos qué clase de cambios se suceden en la distribución de los elementos que caracterizan a los compuestos en función del tiempo de reacción, con relación a las muestras reaccionadas hasta el minuto cero. (El minuto cero del tiempo de reacción significa el tiempo de sumersión de las partículas de corindón en el material de enlace en estado de fusión y la extracción de dichas partículas del mismo.)

En las muestras preparadas para realizar exámenes con la microsonda, comenzamos los *análisis* en la *partícula* de corindón avanzando hacia el material de enlace, midiendo paso a paso la formación de la intensidad del aluminio, potasio y silicio aproximadamente en el trayecto de una línea de 100  $\mu\text{m}$ , perpendicular al límite de fase (la cual logramos captar mediante las observaciones realizadas con el microscopio óptico de la microsonda). Mediante un motor dirigido con la ayuda de cierto mecanismo, la muestra fué movida a una velocidad de 50  $\mu\text{m}/\text{min}$  durante 4 segundos debajo del rayo electrónico inmóvil. Al cabo de cada movimiento se realizó una medida de intensidad o conteo. La intensidad medida en cada uno de los puntos de los elementos fué registrada con ayuda de una máquina de escribir eléctrica. De acuerdo a los datos anteriores medimos la formación de la intensidad de los elementos anteriormente citados en cada 3,3  $\mu\text{m}$ .

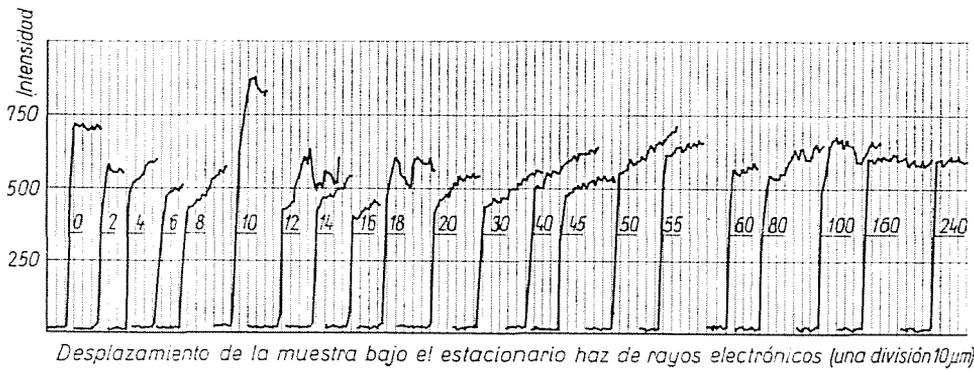
La intensidad de los rayos característicos del tipo de los elementos examinados fué representada en función a la distancia recorrida por la muestra bajo el rayo electrónico. De cada muestra se realizó un gran número de mediciones en distintos lugares de la distribución de las líneas. Tomamos en cuenta el promedio de dichas mediciones, luego de corregirlo adecuadamente.

Los resultados de las mediciones mediante la microsonda son semi-cuantitativos. Debido a la heterogeneidad del sistema corindón-material de





**Fig. 51.** Variación de la intensidad del  $\text{Si}_{K\alpha}$  en las cercanías del límite de fase entre el electrocorindón y el material de enlace en fusión en las muestras tratadas durante 0, 2, 4, 6... 240 minutos



**Fig. 52.** Variación de la intensidad del  $\text{K}_{K\alpha}$  en las cercanías del límite de fase entre el electrocorindón y el material de enlace en fusión en las muestras tratadas durante 0, 2, 4, 6... 240 minutos

es un terreno cercano a éste), se pueden observar fronteras migradoras de diferente concentración, las cuales se forman continuamente. A este proceso no se le ha encontrado todavía una explicación exacta (tiempo de reacción de 8 a 18 minutos).

5.4. Al aumentar el tiempo de reacción, los niveles de concentración toman una forma variada y dentro de las variaciones en la dirección dada se pueden observar compensaciones. Las diferencias de concentración entre las fronteras migratorias que se encuentran más tupidas, son ya más pequeñas. Las muestras de 80 y 100 minutos presentan un comportamiento distinto. En los períodos largos de reacción (160, 240 minutos), conjuntamente con el

aumento de la anchura de la capa de transición, ocurre un aumento del nivel del aluminio. Dentro de la complejidad de los procesos de difusión en la capa de transición y que aún no han sido completamente desentrañados, no he tratado de definir minuciosamente las formaciones de las curvas de intensidad del aluminio y del silicio, sino más vale llamo la atención hacia los cambios de intensidad de característica semejante. La distribución de las líneas está de acuerdo con la micromorfología de las cercanías de los límites de fase formadas durante el proceso de enlace, pero ésta se presenta de una manera mucho más objetiva mediante figuras. Los exámenes realizados mediante la microsonda, son los que caracterizan de mejor forma las distintas etapas del enlace del corindón al analizar la distribución de los distintos elementos en una línea dada; también ayuda, es decir hace posible, la interpretación de los exámenes morfológicos. Junto con esto también hay que recordar que se hace sentir que la capacidad de diferenciación de este método es limitada en el presente estadio de nuestras investigaciones. Mediante el microscopio electrónico se puede percibir en forma muy sensible, los cambios morfológicos que ocurren conjuntamente con la migración de los elementos.

5.5. Los resultados y las conclusiones de los exámenes realizados con el microscopio electrónico sobre la micromorfología de las cercanías del límite de fases, son los siguientes: Las partículas de corindón, sumergidas solamente por un instante en el material de enlace en fusión, presentan una morfología completamente diferenciable del material de enlace. La microestructura del corindón presenta una gran variedad, la cual siempre se diferencia bien del material de enlace (figuras 53—55.)

5.6. La estructura del material de enlace en el límite de las fases sólidas y líquidas, a altas temperaturas, varía al avanzar la reacción. Los elementos estructurales se diferencian y se transforman a una forma más ordenada (figuras 56—61.).

5.7. Al aumentar el tiempo de reacción a 6—8 minutos, conjuntamente con la variación de la estructura del material de enlace el límite de fase, comienza a transformarse también la fase del corindón. Por acción del enlace de la fase del corindón, aparecen en éste elementos característicos de la microtextura de la fase del material de enlace (figuras 62—65.).

5.8. Las figuras 66—76., muestran los distintos grados de la formación de la microestructura de la capa de enlace bien definida y diferente a la estructura de las fases fundamentales (de 10 a 12 minutos de reacción). La terminación de cada período de enlace es fielmente marcada con la transformación de su microestructura, de manera que luego de sucederse las distintas etapas, diferenciadas desde el punto de vista morfológico, y al aumentar el tiempo de reacción, surgen nuevas estructuras equilibradas de enlace cada vez más anchas (por ejemplo las figuras 67., 74., 76., 84.).



*Fig. 53.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (10 000×)  
Tiempo de reacción: minuto 0



*Fig. 54.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (12 000×)  
Tiempo de reacción: minuto 0



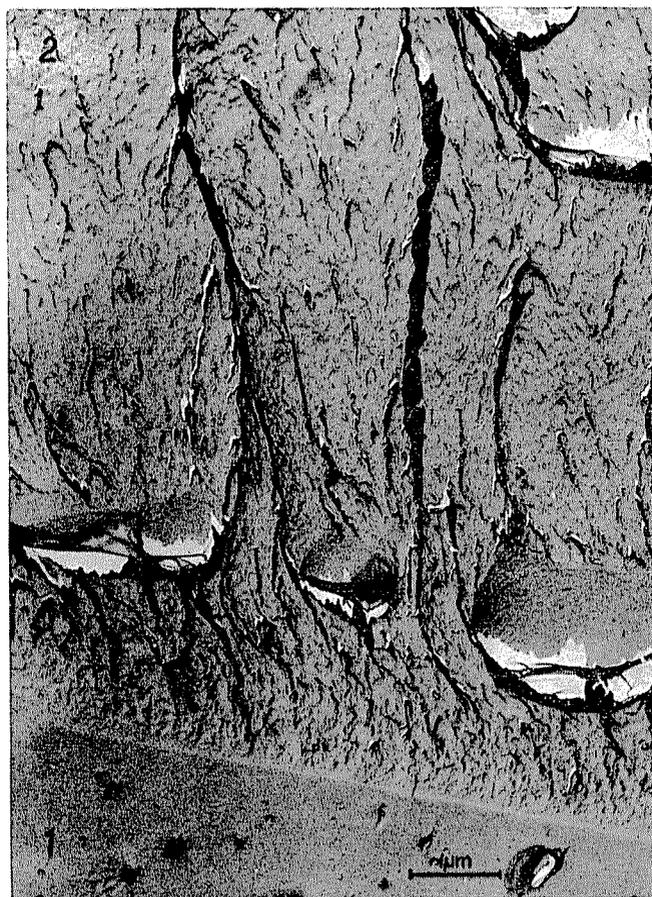
Fig. 56. Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (16 000 ×).  
Tiempo de reacción: 2 minutos



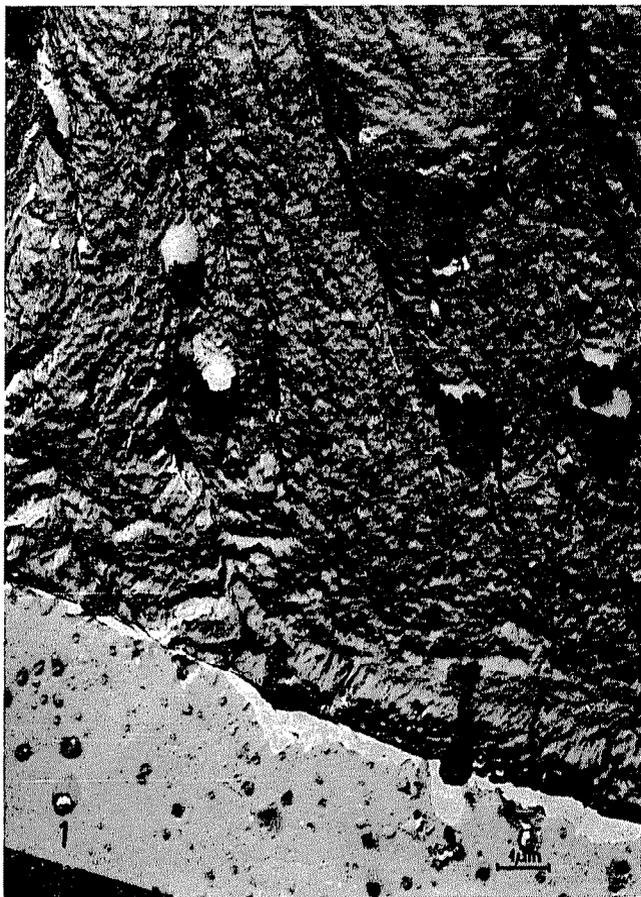
Fig. 55. Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) con contenido de silicato de boro (18 000 ×).



*Fig. 57.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (18 000×)  
Tiempo de reacción: 2 minutos



*Fig. 58.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (18 000×)  
Tiempo de reacción: 4-6 minutos



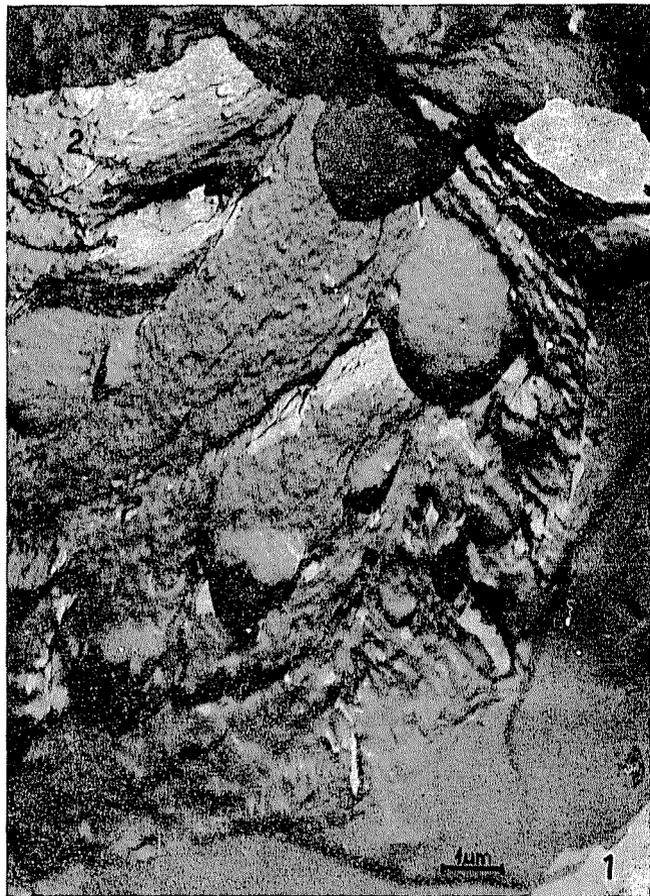
*Fig. 59.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) el y material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (10 000×)  
 Tiempo de reacción: 4–6 minutos



*Fig. 60.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (8000×)  
 Tiempo de reacción: 4–6 minutos



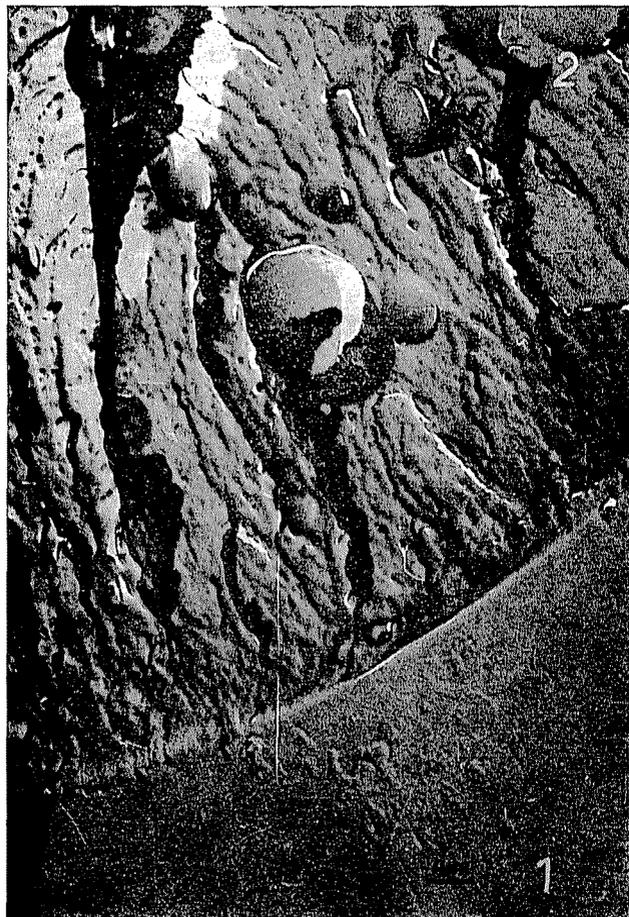
Fig. 61. Exposición bajo microscopio electrónico de límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $10\,000\times$ )  
Tiempo de reacción: 4–6 minutos



*Fig. 62.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (12 000 ×)  
 Tiempo de reacción: 6–8 minutos



*Fig. 63.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (23 000 ×)  
 Tiempo de reacción: 6–8 minutos



*Fig. 64.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (8000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 6–8 minutos



*Fig. 65.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (23 000 $\times$ )



*Fig. 66.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (7000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



*Fig. 67.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (25 000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



*Fig. 68.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $10\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



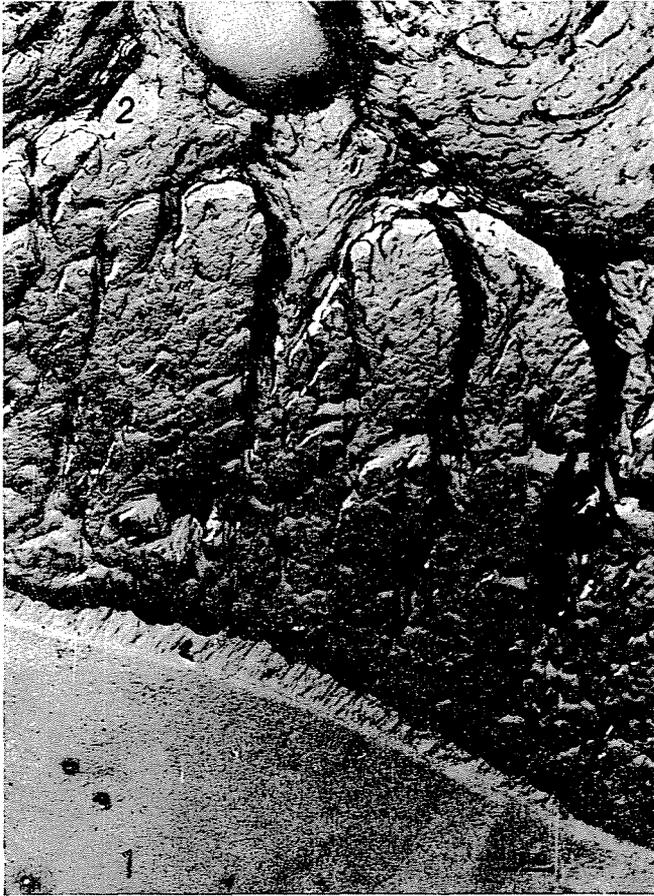
*Fig. 69.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $16\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



*Fig. 70.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $18\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 10—12 minutos



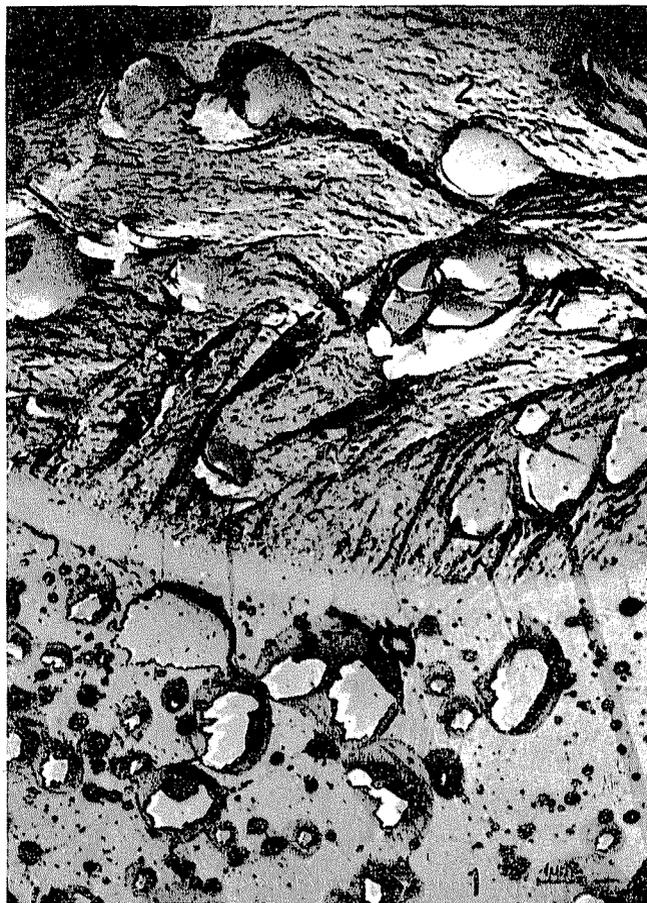
*Fig. 71.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $10\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 10—12 minutos



*Fig. 72.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (10 000  $\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



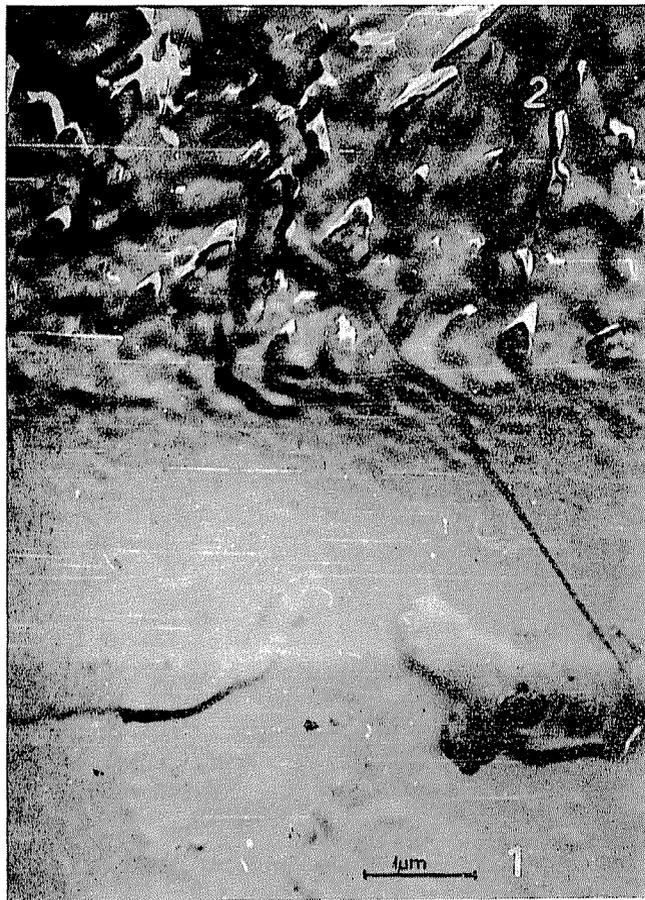
*Fig. 73.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $23\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



*Fig. 74.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $8000\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



*Fig. 75.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (16 000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



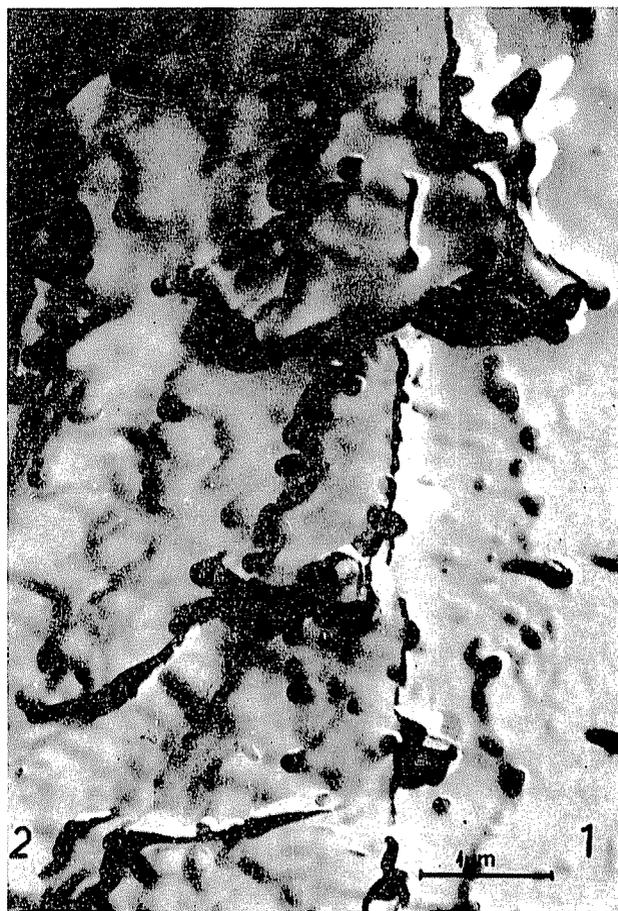
**Fig. 76.** Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $23\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 10–12 minutos



**Fig. 77.** Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $10\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 14 minutos



*Fig. 78.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de fusión (2) de silicato de boro (16 000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 14 minutos



*Fig. 79.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (23 000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 14 minutos



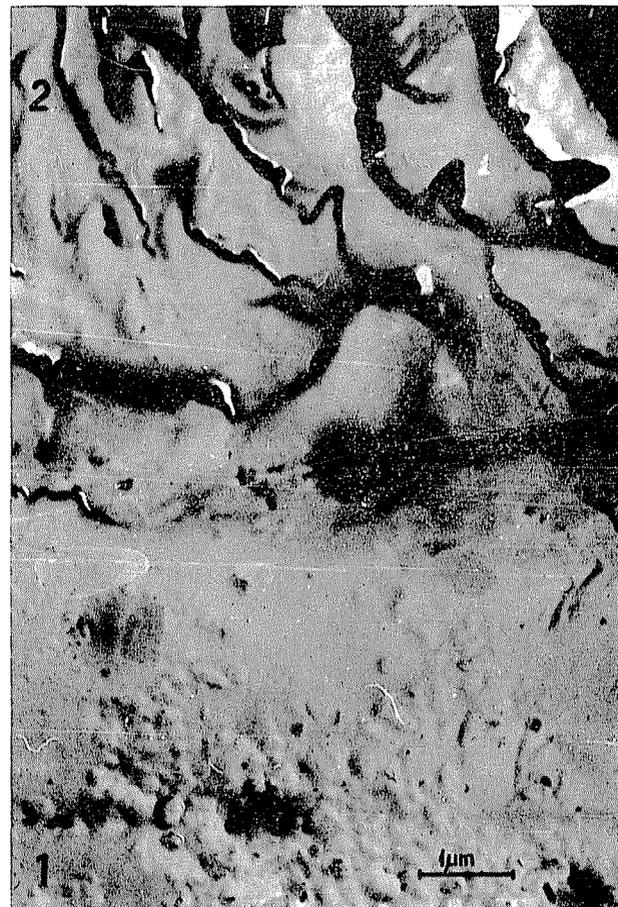
*Fig. 80.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (16 000×)  
Tiempo de reacción: 14 minutos



*Fig. 81.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (35 000×)  
Tiempo de reacción: 14 minutos



*Fig. 82.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $10\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 14 minutos



*Fig. 83.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $16\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 30 minutos

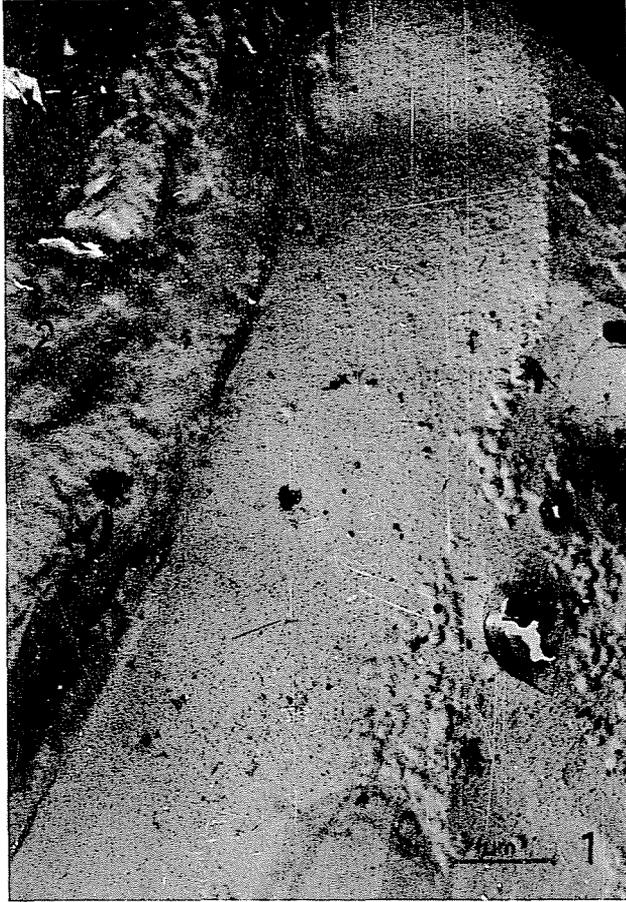


Fig. 84. Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (18 000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 30 minutos

5.9. Las muestras tratadas durante 14 minutos, al ser observadas con la ayuda del microscopio electrónico, presentan una etapa de transformación nueva con relación a las descritas hasta ahora. La marcha de las transformaciones características en las cercanías de límite de fases, pierde velocidad debido a las variaciones de composición ocurridas en ella durante el proceso (figuras 77—82.).

5.10. En las muestras tratadas durante 30 minutos ya se puede observar una nueva capa de enlace con la anchura aumentada (figuras 83., 84.).

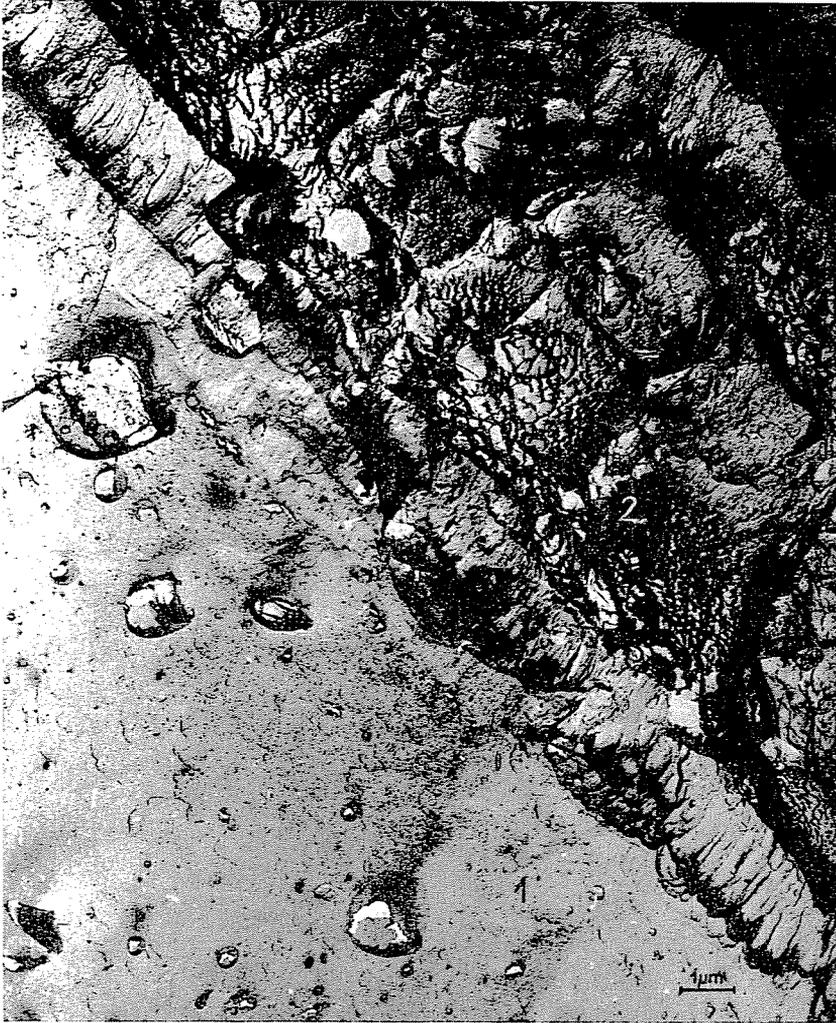
5.11. A continuación presentamos, mediante los dos tiempos de tratamiento más largos, la formación de los períodos característicos morfológicos del límite de fase, sin entrar en los detalles de las transformaciones morfológicas hasta ahora tratadas.



Fig. 85. Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $10\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 160 minutos

En las figuras 85—90., donde presentamos una muestra tratada durante 160 minutos en una graduación de aumento, y otra tratada durante 240 minutos con dos y tres graduaciones de aumento, podemos diferenciar junto a la fase de corindón de estructura invariable, diversas fases de enlace con composiciones y estados químico-físicos variados, demostrando las diferencias morfológicas de la microestructura.

5.12. El gran número de figuras presentadas y la valoración objetiva de éstas, demuestra que en la planificación y ejecución de varios miles de graduaciones de las piedras de esmeril con enlace cerámico, además de las



*Fig. 86.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace de fusión (2) de silicato de boro ( $10\ 500\times$ )  
Tiempo de reacción: 240 minutos

propiedades químico-físicas de los materiales utilizados, la tecnología de cocción juega un papel fundamental.

#### *6. El papel que desempeña la estructura microcristalina en las cargas mecánicas y térmicas de las piedras de esmeril con partículas de corindón*

6.1. La utilización segura de las piedras de esmeril lleva consigo como condición primordial, la presencia de una dureza mecánica adecuada. La dureza mecánica en nuestro caso, se puede definir en primer lugar mediante la resis-



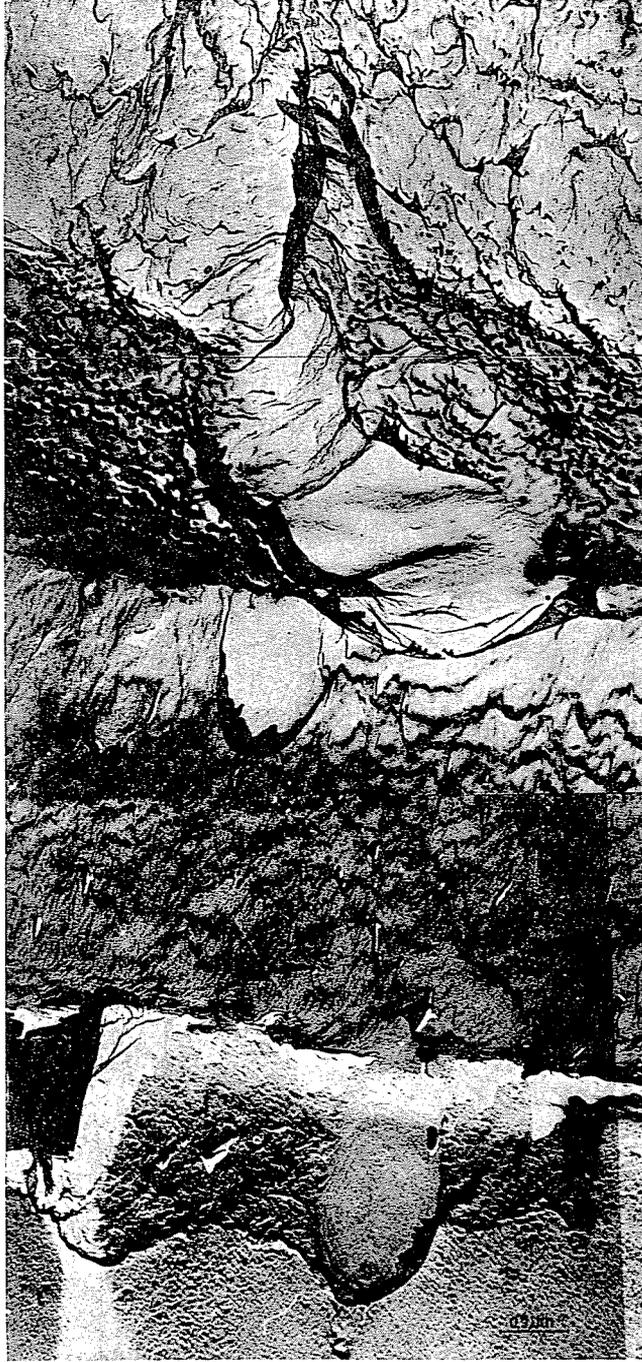
*Fig. 37.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro ( $28\ 000\times$ )  
Tiempo de reacción: 240 minutos



Fig. 88. Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (18 500 ×)  
Tiempo de reacción: 240 minutos

tencia a la tracción. Las fotos realizadas con el microscopio electrónico scanning, de las superficies fracturadas durante las pruebas de resistencia a la tracción en los cuerpos de pruebas con partículas de electrocorindón, ilustran el papel jugado junto al material de enlace amorfo, de la estructura microcristalina de las partículas de corindón (figuras 91—93.). En las fotos de mayor aumento se puede observar bien que por acción de las cargas de tracción el enlace entre los microcristales se rompe.

6.2. La relación existente entre el funcionamiento y desgaste de las piedras de esmeril y partículas de corindón y la formación microcristalina, la



*Fig. 89.* Exposición bajo microscopio electrónico del límite de fase entre el electrocorindón (1) y el material de enlace en fusión (2) de silicato de boro (37 000 $\times$ )  
Tiempo de reacción: 240 minutos

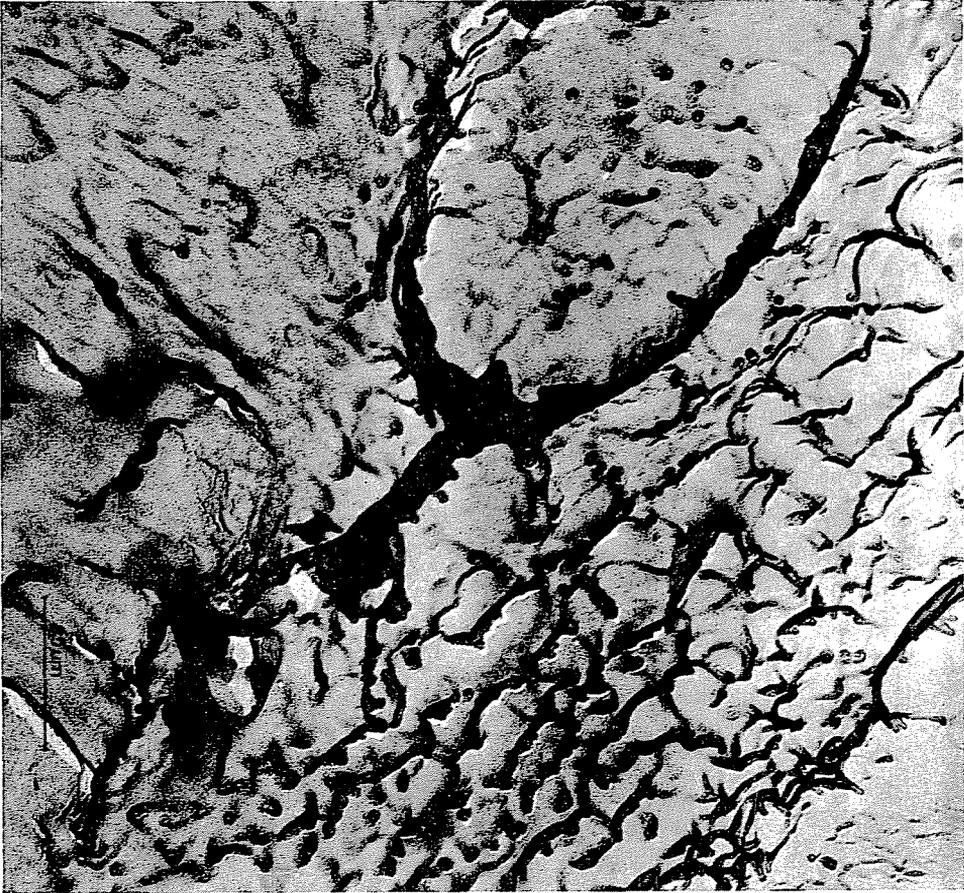
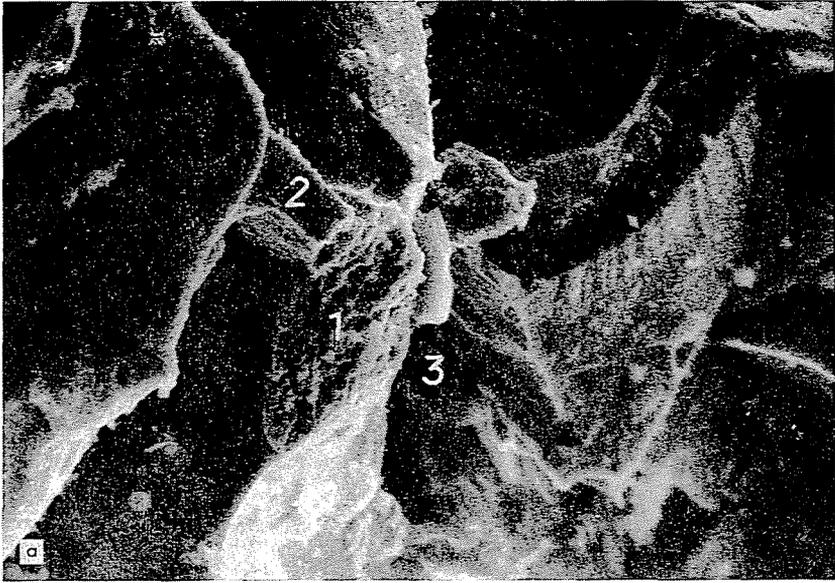


Fig. 90. Transformaciones micromorfológicas en el material de enlace en fusión originadas por variaciones en la concentración. Exposición bajo microscopio electrónico (62 000 $\times$ ) (detalle de la figura 92)

examinamos en las superficies de desgaste de las piedras esmeril en forma de ruedas dentadas utilizadas en condiciones de taller. El resultado de un gran número de pruebas demuestra irrefutablemente que el desgaste de las partículas esmeriladoras está relacionado directamente con el desgaste de los microcristales de corindón.

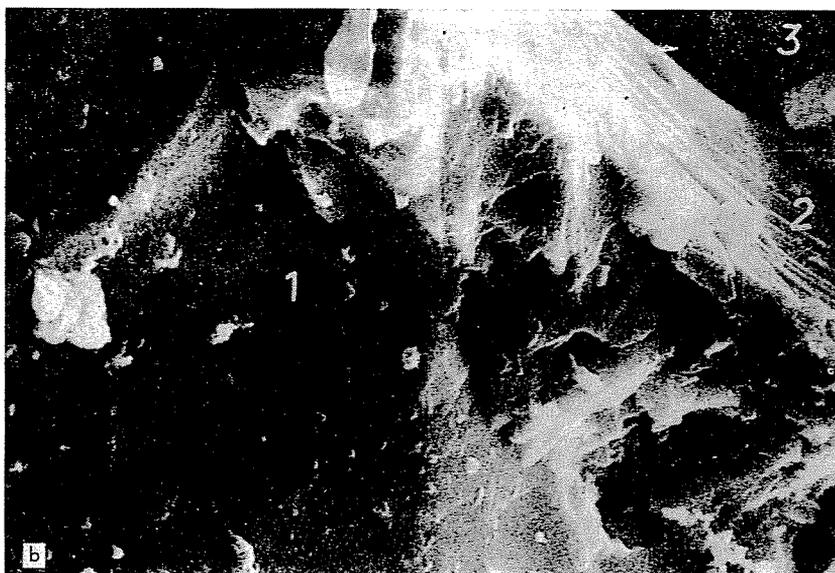
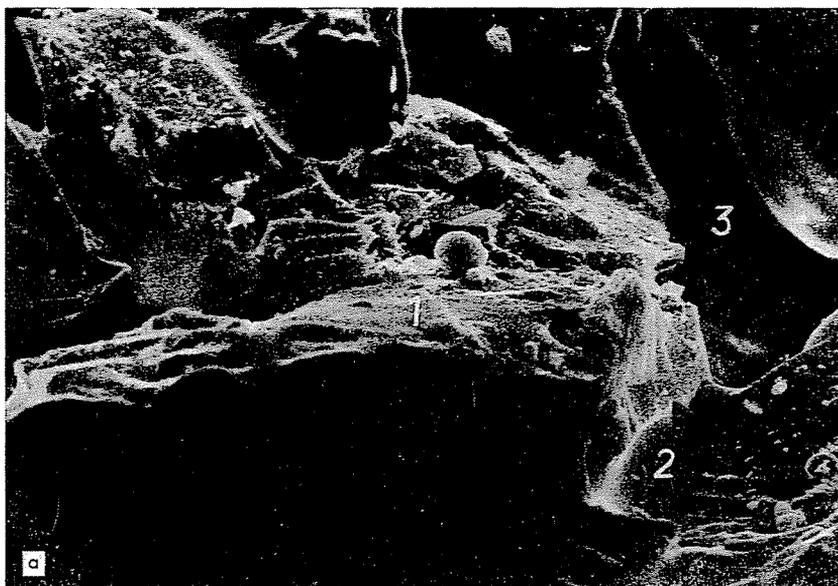
La figura 94, insertada como ejemplo, muestra las huellas del desgaste de un microcristal hexagonal de corindón. Primeramente, antes del esmerilado, presentaba una forma aún sobresaliente, luego muestra una superficie lisa de desgaste producida por la carga y el rozamiento. En los vértices del cristal de forma hexagonal se pueden observar micropuentes que se conectan a la envoltura del material de enlace, los cuales rodean en forma de pilares el microcristal de corindón.



*Fig. 91.* Exposiciones bajo microscopio electrónico de tipo scanning de la superficie de los cuerpos de ensayo de las piedras de esmeril de gránulo de corindón con enlace cerámico, después del quebrantamiento de los mismos. (1 superficie del electrocorindón, 2 puente del material de enlace, 3 poro de aire)

a) (1400×)

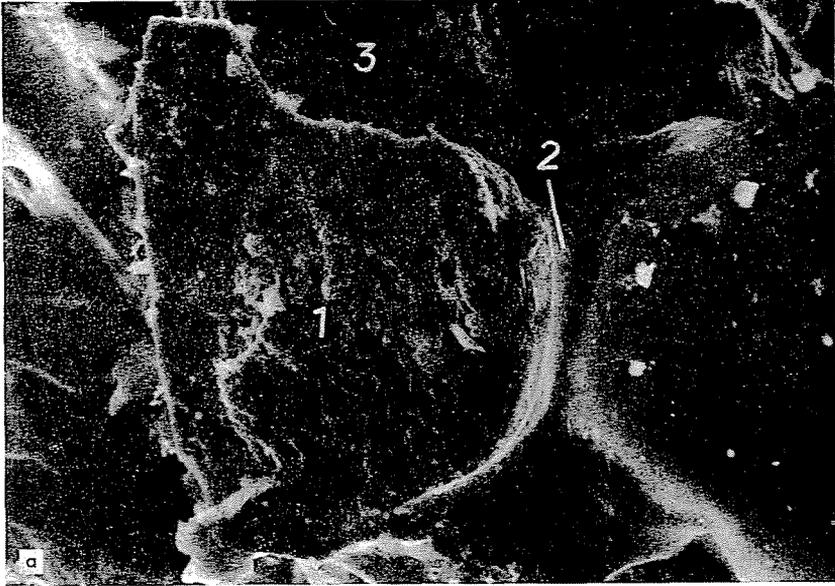
b) (6000×)



*Fig. 92.* Exposiciones bajo microscopio electrónico de tipo scanning de la superficie de los cuerpos de ensayo de las piedras de esmeril de gránulo de corindón con enlace cerámico, después del quebrantamiento de los mismos. (1 superficie del electrocorindón, 2 puente del material de enlace, 3 poro de aire)

a) (1300×)

b) (4000×)



*Fig. 93.* Exposiciones bajo microscopio electrónico de tipo scanning de la superficie de los cuerpos de ensayo de las piedras de esmeril de gránulo de corindón con enlace cerámico, después del quebrantamiento de los mismos. (1 superficie del electrocorindón, 2 puente del material de enlace, 3 poro de aire)  
a) (1300×).  
b) (4000×)



Fig. 94. Exposición con el microscopio electrónico de la superficie de un microcristal de corindón (1) después del esmerilado; en las puntas del cristal se pueden observar los “pilares de contención” (2) del material de enlace cerámico (23 000×)

6.3. En la figura 95, podemos estudiar la superficie de un agrupamiento cristalino que se encuentra en otra dirección. Se pueden observar haces de microcristales intactos, junto a los ya reblandecidos y rebajados durante el proceso del esmerilado, en las capas superficiales. Entre ellos aparecen huellas de grietas anteriores a la fragmentación de los microcristales desgastados.

6.4. Las figuras 94. y 95. son, ejemplos típicos de las condiciones del uso de las piedras de esmeril, son presentadas con el objetivo de ilustrar la complejidad extrema de las condiciones de su utilización y sus efectos. En este punto se hace necesario también llamar la atención de un capítulo de la primera monografía, el cual presenta el esquema general de las reacciones llevadas a cabo durante el proceso del esmerilado. Las formas de la micro-



*Fig. 95.* Capa superficial de corindón puro reblandecida durante el esmerilado (1) y huellas preliminares de las fracturas en la superficie aún intacta del electrocorindón (2). Exposición bajo microscopio electrónico (27 000 ×)

estructura, presentadas anteriormente en un gran número de figuras, al ser utilizada la piedra de esmeril en condiciones de extrema carga, muestran la pérdida de la forma original al fundirse en parte el material de enlace, lo que se denomina “derretido secundario”. Este derretido secundario penetra en las rajaduras que existen en los microcristales originales o creadas durante la carga, lo que produce cambios en su comportamiento ante el autoafilado de las partículas esmeriladoras. El proceso anteriormente esquematizado es influido definitivamente, en lo referente a su normación y reproductividad, por las capas inferiores a la superficie de trabajo que aún no han sido afectadas.

## 7. Basamento de la normalización de calidad de las piedras de esmeril

7.1. La designación de calidad de las piedras de esmeril utilizada mundialmente en la actualidad (datos geométricos, calidad y tamaño de las partículas esmeriladoras, tipo del enlace, dureza del enlace, consistencia, etc.), no dan suficiente información acerca de las condiciones de fabricación ni tampoco acerca del comportamiento esperado durante la utilización.

7.2. Como resultado de las complejas investigaciones referentes a la fabricación y utilización de las piedras de esmeril, y basándome en una valoración crítica de la bibliografía internacional, ya en la primera mitad de 1960 había encontrado y escogido el módulo de elasticidad como la característica más general de la calidad de las piedras de esmeril. Con posterioridad se demostró que el módulo de elasticidad, entre todos los demás factores de calidad, era en realidad el más importante. Datos bibliográficos en los últimos años han demostrado cada vez en mayor medida esta afirmación. Mi afirmación la demuestro primeramente desde el punto de vista de la utilización práctica (capítulo 7. 3.), además de un análisis profundo de la microestructura en las etapas características de la fabricación en dos fases (capítulos 7.4. y 7.5.)

7.3. Es también un factor experimentalmente demostrado el hecho de que las partículas esmeriladoras durante el esmerilado, al entrar en contacto con la superficie a trabajar, cambian de posición durante el tiempo de contacto en dirección tangencial y radial. La medida en que varían su posición está determinada por las condiciones tecnológicas utilizadas y por las propiedades elásticas del material de enlace (*R. Hahn, J. Peklenik*).

El nivel técnico del acabado realizado con piedras de esmeril, es decir la calidad de la superficie trabajada (precisión en la medida, porosidad superficial, errores en la forma) está determinada estrictamente por la rigidez del contacto entre el material a trabajar y la piedra de esmeril (la fuerza necesaria, en Kg/mm, para producir el movimiento elástico unitario es lo determinante). La reproductividad de la superficie esmerilada, de tiempo en tiempo, depende decisivamente de las propiedades elásticas de las piedras de esmeril, si los otros factores se mantienen invariables (máquina esmeriladora, piedra de trabajo, parámetros térmicos) (*R. Snoeys, M. C. Shaw, R. P. Lindsay*). Durante el esmerilado, la variación elástica de la forma de las partículas esmeriladoras es despreciable frente a la del material de enlace, por esto la elasticidad del material de enlace es lo determinante. De esto se deduce que el enlace entre estas dos fases, es decir la calidad de posición que toma la partícula esmeriladora en el material de enlace, es de fundamental importancia. Ya he anotado anteriormente que el reconocimiento de este factor, su investigación detallada y demostración, así como la presentación de éste como primero en foros internacionales, es un elemento fundamental de mi trabajo investigativo.

Datos bibliográficos, así como bases experimentales, demuestran en amplios círculos que el 85% de la energía utilizada en el esmerilado se transforma en calor, el mismo que pasa a la superficie de la pieza que se trabaja. El aumento de temperatura producido en la superficie de la pieza que se trabaja, depende de la longitud del manantial de calor, es decir de la longitud en que entra en contacto la piedra de esmeril y la pieza de trabajo. Esta longitud de contacto depende de la piedra de esmeril, mejor dicho del módulo de elasticidad del material de enlace.

La fabricación moderna de piedras de esmeril, basándonos en lo anterior, debe de tener como objetivo fundamental lograr la obtención de piedras de esmeril con un módulo de elasticidad óptimo.

En los capítulos 7.4, y 8.5., muestro dos períodos de mi trabajo investigativo relacionado con la variación elástica de las piedras de esmeril con relación a los resultados alcanzados.

La parte tratada en el capítulo 7.4., resume las investigaciones realizadas en los años 1964—65, mientras que el capítulo 7.5. resume el trabajo realizado desde entonces hasta 1975. En resumidas cuentas estos dos capítulos se relacionan entre sí complementándose en gran medida el uno al otro.

7.4. Las piedras de esmeril frente a las cargas más diferentes, reaccionan esmerilando y a la vez desgastándose también. Por ejemplo si trabajamos con una piedra de esmeril a 5000 revoluciones/minuto, significaría que las partículas esmeriladoras ubicadas en la superficie de trabajo reciben, junto a los puentes del material de enlace, 5000 golpes por minuto. Y a una velocidad tangencial mayor que los 100 m/sec, se requiere que el material de enlace asegure firmemente a las partículas esmeriladoras. Sin embargo el material de enlace que fija fuertemente, es poco resistente a los cambios de temperaturas que surgen durante el esmerilado, y así los cambios bruscos de temperatura traen como consecuencia cambios de volumen (dilatación) que rompen el enlace. Los requerimientos de dureza son aumentados debido a que durante el esmerilado, las partículas esmeriladoras varían su posición perpendicular y tangencialmente con respecto a la superficie de trabajo, mientras que en los filos de las partículas surgen temperaturas extremadamente altas, alrededor de 2000 °C. La variación periódica de lugar que sufren las partículas esmeriladoras, la dilatación debida a los cambios bruscos de temperatura, y junto a esto las cargas de presión, tracción, deformación, de choque y corte, solamente pueden ser resistidas por un enlace lo suficiente duro y elástico. Para crear deformaciones donde el material de enlace presenta un módulo de elasticidad muy grande, se necesitan grandes fuerzas, o lo que es lo mismo, en el caso de un módulo de elasticidad grande, al surgir deformaciones por acción del golpeo, aparecen grandes tensiones en el material de enlace. Estas tensiones sobrepasan la resistencia del material a la tracción y a las deformaciones, por lo que el material se quiebra. En el caso de un módulo de elasticidad más

pequeño, el material de enlace es más resistente a los cambios bruscos de temperatura.

Si hacemos un recuento de algunos productos cerámicos (los cuales son comparables con los materiales de enlace en las piedras de esmeril), como los esmaltes y los materiales refractarios en cuanto a su resistencia térmica y mecánica, apenas, podemos advertir alguna correlación explícita.

En el caso de las piedras de esmeril, debido a la presencia de fases heterogéneas en proporciones variables y junto a esto la diversidad en su utilización, se hace mucho más complicada la situación.

Entre los diversos métodos de análisis, el más práctico en la actualidad es la medida del módulo de elasticidad, por ser éste el más adecuado a las características de la construcción de las piedras de esmeril y ser el más ajustado a las cargas generadas durante su utilización.

La ley de Hooke es la ley básica en los estudios de resistencia de materiales, la cual a más de ser sencilla, caracteriza el comportamiento de la mayoría de los materiales. Los factores de elasticidad que expresan la proporcionalidad, son las más importantes características de las propiedades de los materiales.

Debido a la gran diferencia existente entre el módulo de elasticidad del material de enlace y el de las partículas de corindón, existe la posibilidad de realizar las mediciones de la deformación longitudinal del enlace de las piedras de esmeril sin que la fase de corindón impidiese la valoración de los resultados.

Al principio realizamos nuestras medidas con un equipo que mide la dilatación, basado en la medida de la resistencia eléctrica, y que es apto para las medidas dinámicas de los cambios mecánicos de forma.

Preparamos barras prensadas a partir de la mezcla de corindón húmedo y de material de enlace en una proporción en peso de 85 : 15 por ciento; una parte de las barras las tratamos a una temperatura de 1250 °C y la otra parte a 1300 °C. Durante esta prueba medimos o calculamos los siguientes datos:

a) El alargamiento longitudinal específico de los cuerpos de prueba en función de la carga.

b) La contracción transversal específica en función de la carga.

c) De los resultados de las anteriores mediciones se puede calcular el módulo de elasticidad (E).

d) Conociendo el coeficiente de Poisson ( $\mu$ ) y el módulo de elasticidad, se puede calcular el coeficiente de elasticidad de corte (G) mediante la siguiente fórmula

$$G = \frac{1\mu}{2\mu + 1} E$$

e) Al aumentar la carga hasta la ruptura del cuerpo de prueba, obtenemos el valor de la resistencia máxima del material antes de quebrarse ( $\sigma_B$ ).

Los resultados de las mediciones están resumidos en la tabla número 1. y en la figura 96. En las figuras los valores del alargamiento longitudinal

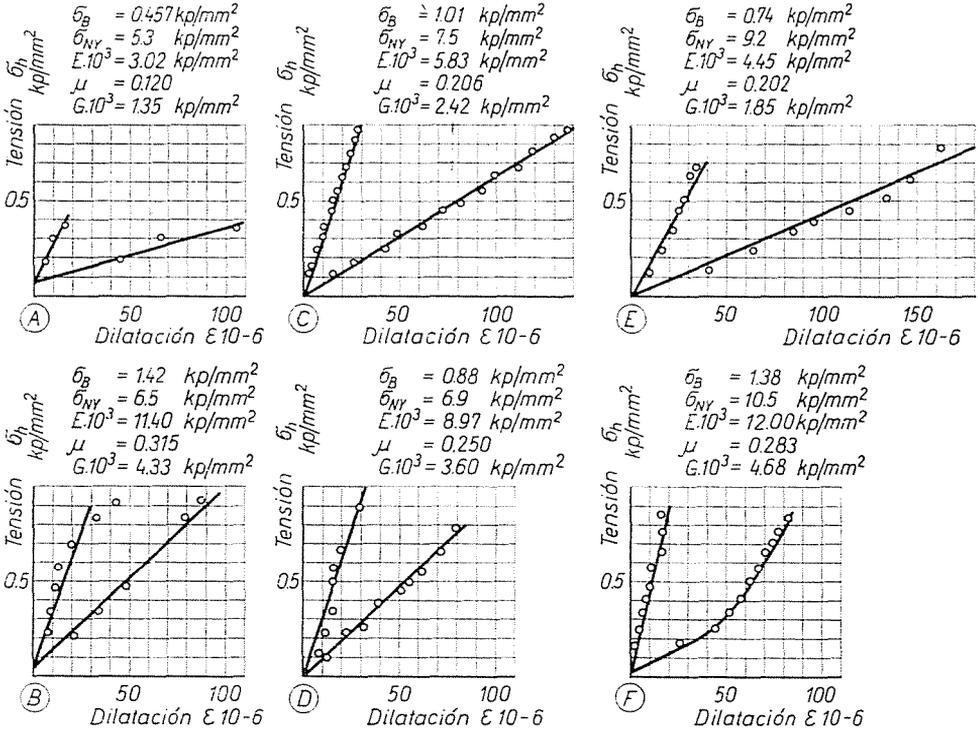


Fig. 96. Deformaciones elásticas de las piedras de esmeril cocidas a 1250 y a 1300 °C

específico y la correspondiente contracción transversal específica (las rectas más enpinadas) aparecen representadas conjuntamente.

Los datos de la tabla número 1 y de la figura 96, demuestran que las propiedades de las piedras de esmeril bajo condiciones dadas, dependen fundamentalmente del tratamiento térmico a que fueron sometidas. Las temperaturas altas de cocción aumentan los módulos de elasticidad y junto con esto aumenta la rigidez del material de enlace.

Ya con anterioridad, los exámenes realizados mediante los métodos de difracción roentgenográfica y termoanalíticos han señalado al unísono, que las reacciones que acompañan la formación del enlace en el material de enlace, se aceleran al aumentar las superficies reaccionantes de los materiales o lo que es lo mismo, en el caso de mantenerse invariable la composición, se forma

Tabla I

Valores de la resistencia de las piedras de esmeril con enlace cerámico

Notación	Muestra		Resistencia a la tracción, kgf/mm <sup>2</sup>	Resistencia a la presión, kgf/mm <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad (E) en el caso de tracción, 10 <sup>2</sup> kgf/mm <sup>2</sup>	Factor de Poisson $\mu$	Módulo de elasticidad (G), de corte, 10 <sup>2</sup> kgf/mm <sup>2</sup>
	nomenclatura	temperatura de cocción, °C					
A	Enlace de Illites	1250	0,457	5,3	3,02	0,120	1,35
B	Enlace de Illites	1300	1,42	6,5	11,40	0,315	4,33
C	Enlace de Illites modificado	1250	1,01	7,5	5,83	0,206	2,42
D	Enlace de Illites modificado	1300	0,88	6,9	8,97	0,250	3,60
E	Enlace de encristalizado	1250	0,74	9,2	4,45	0,202	1,85
F	Enlace de encristalizado	1300	1,38	10,5	12,00	0,283	4,68

el enlace a temperatura más baja con materiales de enlace de superficie específica mayor. Mientras que la temperatura óptima de cocción del material de enlace de tipo illites resulta ser de 1300 °C ya que es entonces cuando presenta mayor resistencia a la tracción y a la presión, la temperatura óptima de cocción del mismo material cuando se encuentra finamente molido es de 1250 °C, y un tratamiento térmico a temperaturas mayores conllevaría a una disminución de la dureza. En las muestras con material de enlace de tipo illites modificado, nos encontramos con una mayor dureza y una menor rigidez (menor módulo de elasticidad).

7.5. Si comparamos las condiciones de elaboración de las piedras de esmeril con los resultados de las medidas del módulo de elasticidad determinado con la ayuda de frecuencias de ondas sonoras, podemos también percatarnos de que con los parámetros de fabricación, el módulo E (módulo de elasticidad), puede ser sensiblemente influido. La figura 97. resume importantes detalles en lo referente al módulo de elasticidad desde el punto de vista de la utilización y de la fabricación de las piedras de esmeril. Las partes de la figura 97/g y 97/h contienen los resultados de nuestras propias mediciones. La figura 101/g muestra que el módulo de elasticidad varía linealmente con relación a la cantidad del material de enlace. Indiscutiblemente se destaca el papel importante que desempeñan las condiciones de cocción. La figura 97/h presenta los resultados de los análisis realizados con ayuda de ondas sonoras del módulo de elasticidad, llevados a cabo en las muestras dadas a conocer en la parte introductoria del capítulo 5, o sea en las muestras de piedras de esmeril con una composición del 85% en peso del conocido electrocorindón y

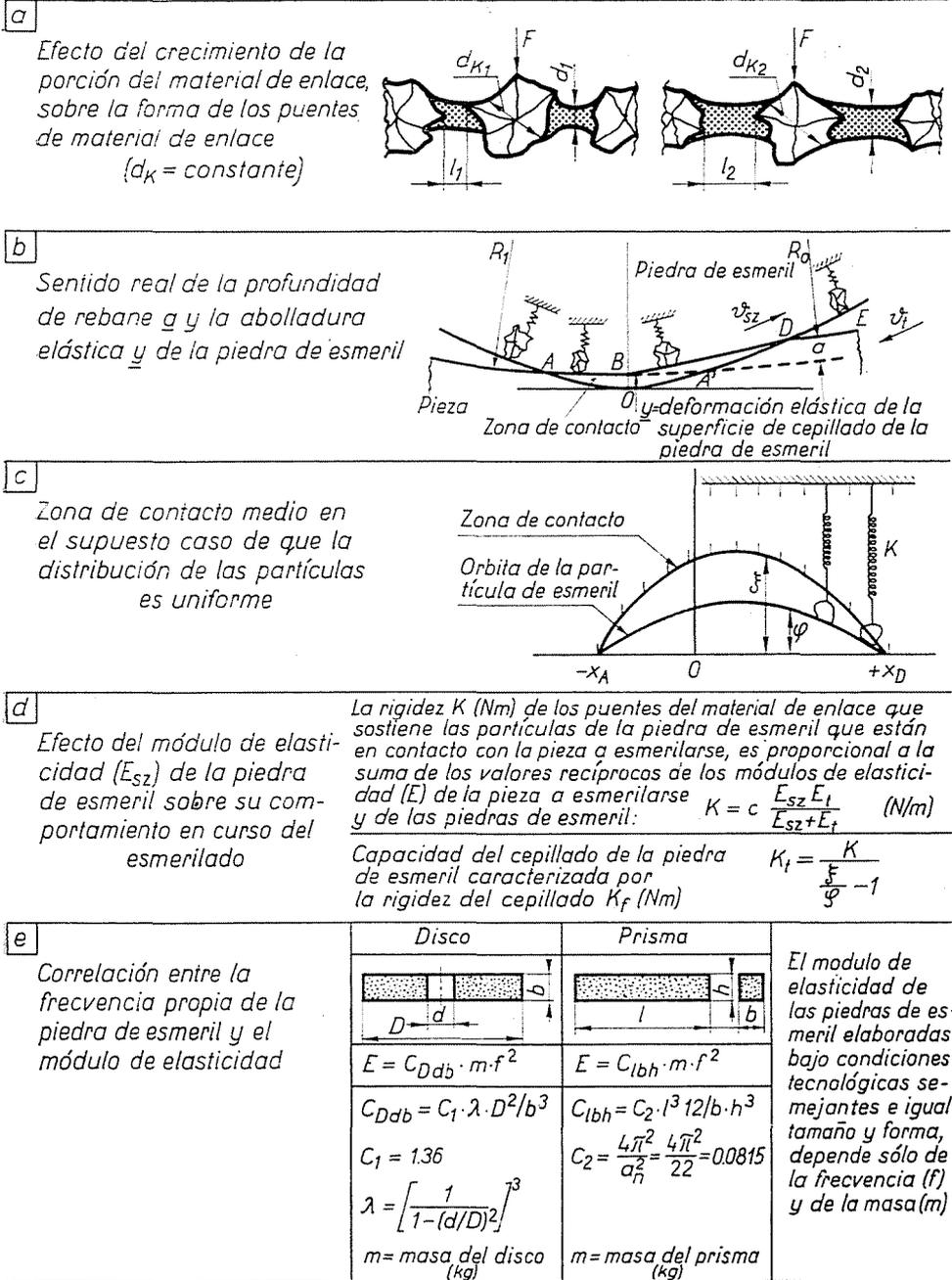
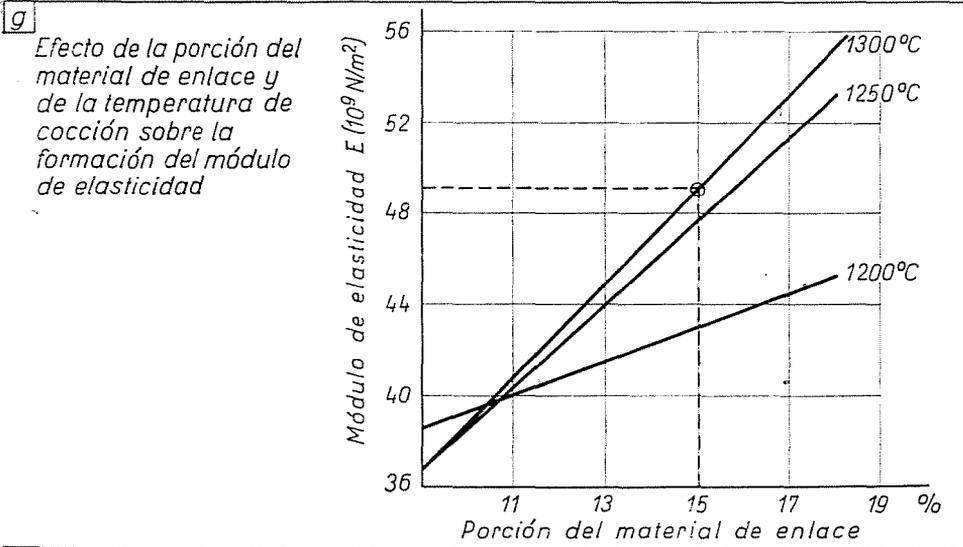
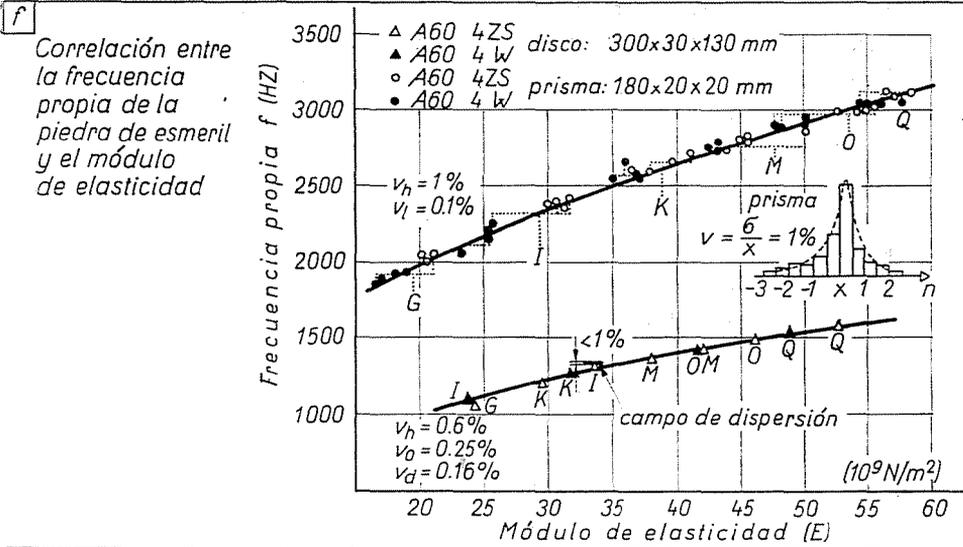


Fig 97. Deformaciones elásticas de las piedras de esmeril



15% del material de enlace y cuya medida es de  $50 \times 10 \times 15$  mm, siendo tratadas a 1300 °C durante intervalos de tiempo diferentes.

En estos exámenes prácticamente todos los parámetros se mantuvieron invariables, solamente en el tiempo de tratamiento térmico se diferenciaban las muestras, y así las diferencias de módulo de elasticidad muestran el efecto de la formación de la capa de enlace.

En las mediciones realizadas del módulo de elasticidad (E) con ayuda de ondas sonoras, de la composición en los límites de fases, y que conlleva a

variaciones en la microestructura, nos percatamos de que durante el comienzo del transcurso del tratamiento térmico, en una etapa más corta se presentan variaciones, medida de las cuales luego pierde importancia. Aún en la actualidad, a nivel mundial, tratan de utilizar diversos tipos de materiales de enlace que aseguren propiedades especiales, utilizándose para ello un gran número de variedades y de composiciones. Frente a esto tenemos el conocimiento profundo y necesario de los detalles importantes del proceso de cocción, que sumado a lo anterior, pone al alcance de nuestras manos posibilidades numerosas, sensibles de variación. Naturalmente, la debida utilización de dichas posibilidades necesita de un proceso de fabricación, planificado con precisión y con condiciones de alto nivel. Lo que también había deseado destacar con el título del capítulo, es el hecho de que con la valoración compleja de las investigaciones relacionadas sobre el módulo de elasticidad y con las deducciones prácticas derivadas de ella, pretendemos crear las bases de un nuevo sistema de control de calidad y calificación de las piedras de esmeril.

Los complejos exámenes realizados con la profundidad indicada, sobre la microestructura y propiedades mecánicas, no sólo desempeñan su papel en el caso de las cerámicas de corindón y carburo de silicio, sino que también se hace necesaria su participación en la calificación y elaboración moderna de cualquier producto técnico cerámico.

En lo sucesivo permanece aún como objetivo central, la profundización y ampliación de la significación cuantitativa tanto de las propiedades mecánicas y otras propiedades cerámicas del carburo de silicio y óxido de aluminio, como los exámenes micromorfológicos ilustrados en las figuras 53—90.

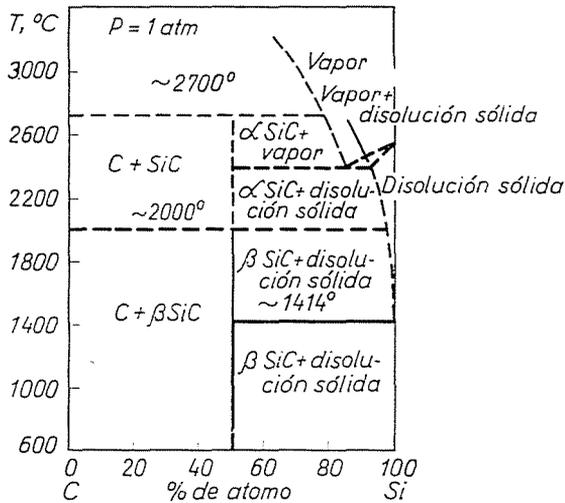
### 8. Partícula esmeriladora de carburo de silicio

Las propiedades relacionadas con la estructura cristalina de las partículas de carburo de silicio son extremadamente variadas y desde el punto de vista práctico poco conocidas, motivo por el cual este capítulo contiene un volumen mucho menor de resultados investigativos que el capítulo relacionado con el corindón. A esto se suma el factor de que, ajustándonos a las necesidades, los exámenes realizados en este terreno los llevamos a cabo con menores inversiones.

El carburo de silicio es conocido por primera vez como un material elaborado artificialmente, luego se encontró en la naturaleza en pequeñas cantidades. El nombre mineralógico del carburo de silicio es „moissanit“. Moissan descubrió en un meteorito de hierro encontrado en el Cañon del Diablo en Arizona, formaciones de carburo de silicio de color verde que se encontraban firmemente unidas con diamante.

La formación de carburo de silicio fué observada primero por *Berzelius* (1810, 1824), luego por *Despretz* (1849) y *Cowles* (1884). El descubrimiento de

a) Diagrama de equilibrio carbono-silicio



b) Las más importantes variedades de carburo de silicio

Variedades	Símbolo de ramsdell	Orden de estratificación	Número de capas dobles en la celdilla unidad	Sistema cristalino	c/a ideal	
$\beta$ -SiC	3C	ABC ABC...	3	Regular $T_d^2 - F \bar{4}3m$	$\sqrt{6} = 2.450$	
$\alpha$ -SiC	SiC I	15R	ABCBACABACBCABC...	15	Romboédrico $C_{3V}^5 - R\bar{3}m$	$5\sqrt{6} = 12.247$
	SiC II	6H	ABCACB...	6	Hexagonal $C_{6V}^4 - P\bar{6}_3mc$	$2\sqrt{6} = 4.899$
	SiC III	4H	ABAC...	4	Hexagonal $C_{6V}^4 - P\bar{6}_3mc$	$4/3\sqrt{6} = 3.266$

Fig. 98. a) Diagrama de equilibrio silicio-carbono  
b) Modificaciones más importantes del carburo de silicio

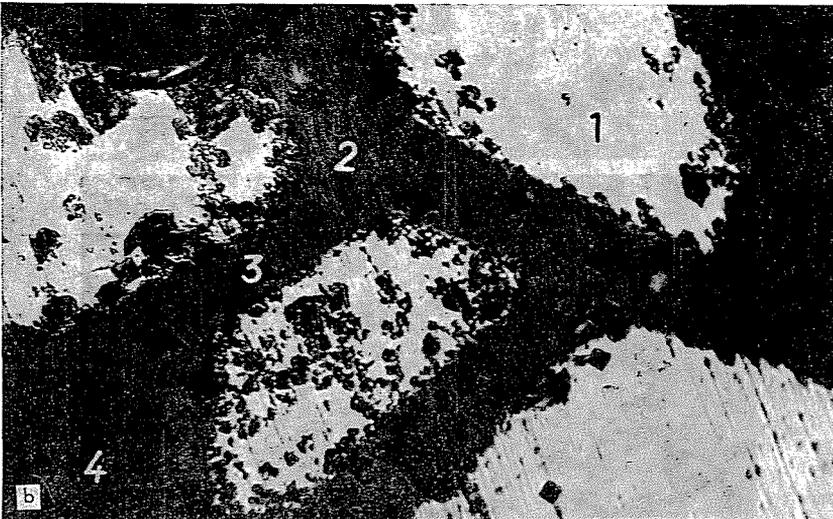
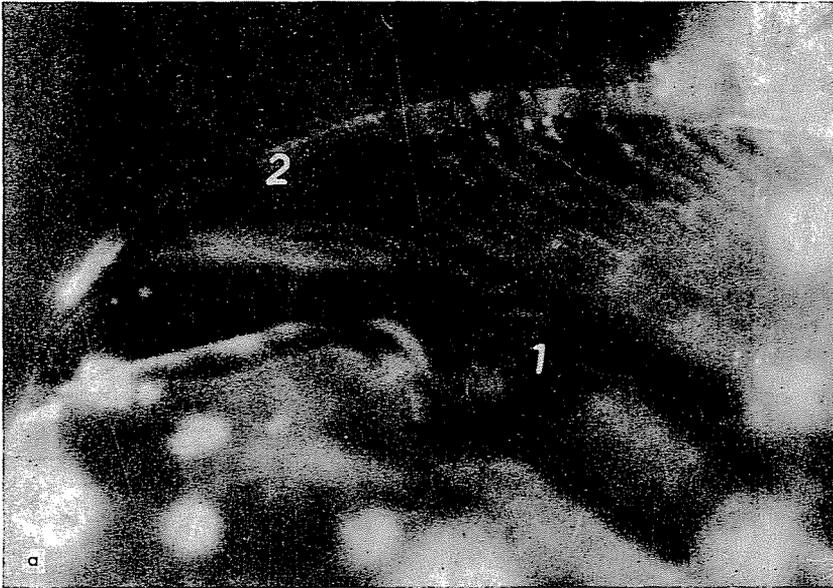
su fabricación industrial se debe a *Acheson* (1891). *Despretz* y *Acheson* tratando de elaborar diamante, obtuvieron por casualidad carburo de silicio. En un derretido de arcilla obtuvieron una sustancia cristalina muy dura, cuya composición química al principio no se conocía. *Acheson* lo catalogó como corindón con contenido de carbono, por eso al principio lo denominó carbocorindón, más tarde solamente como carborundom. Los exámenes posteriores demostraron que lo descubierto fué un nuevo compuesto que responde a la fórmula global SiC. *Acheson* obtuvo licencia para utilizar la nueva sustancia en la elaboración de partículas esmeriladoras e inauguró la primera fábrica de carburo

de silicio en el Niágara (Carborundum Comp. 1891). De los diagramas de estado del carbono-silicio encontrados en la bibliografía presentamos uno, elaborado detalladamente, en la figura 97/a. La importancia del carburo de silicio, ya en los años posteriores a su descubrimiento y al desarrollo de su fabricación industrial, fué grande. Los terrenos de su utilización en los primeros tiempos fueron la industria de herramientas esmeriladoras y la fabricación de materiales refractarios. La utilización multifacética en terrenos especiales, del carburo de silicio (SiC) comenzó en los años posteriores a la segunda guerra mundial. La utilización se amplió en los terrenos más diversos. Unido a los productos clásicos elaborados a partir del carburo de silicio (industria eléctrica, materiales refractarios, materiales esmeriladores) surgen nuevos terrenos de su utilización como semiconductores de carburo de silicio, punta de cohetes, boquillas especiales, en las baterías nucleares y como intercambiador de calor en la técnica nuclear. Ultimamente se elaboran materiales aislantes del calor, materiales protectores de superficies, y bases de catalizadores de propiedades muy ventajosas, a partir del carburo de silicio. Los hilos de carburo de silicio, más finos que los de seda artificial, se utilizan en cubiertas protectoras contra el fuego, debido a su elasticidad y a su resistencia ante el calor. A partir de ellos se elaboran también los blindajes protectores de las aeronaves.

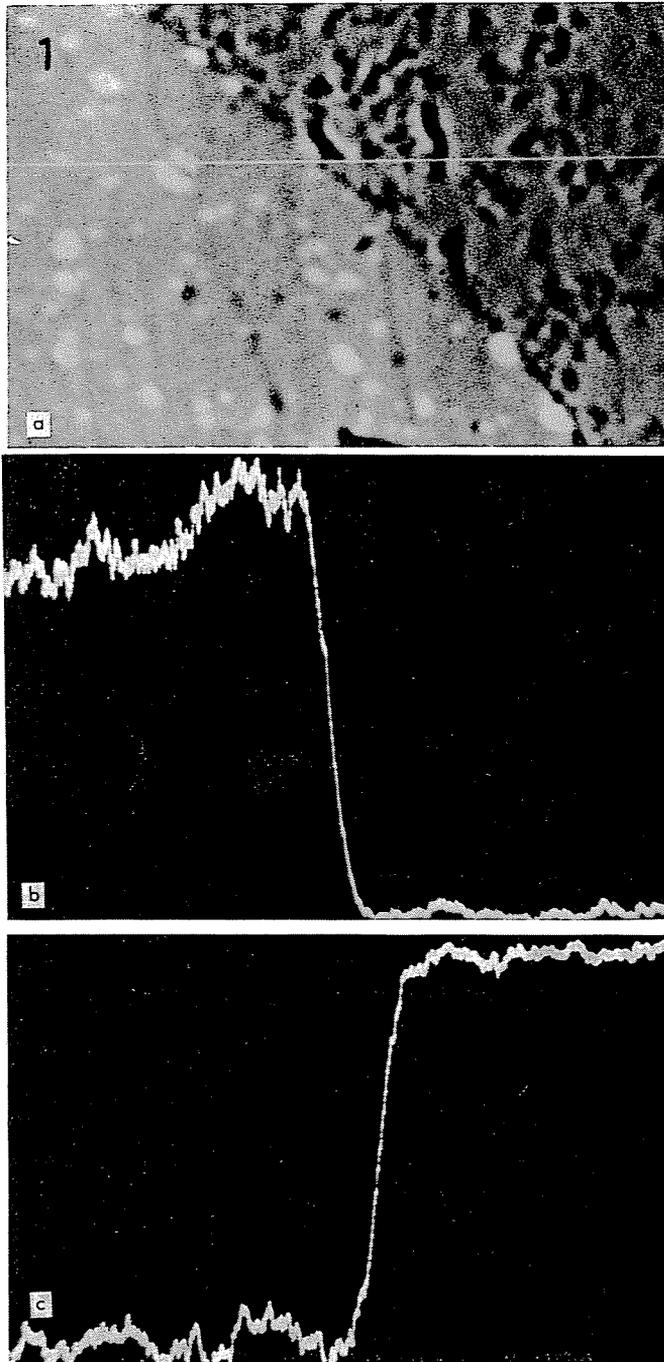
El carburo de silicio presenta dos estados polimórficos: el  $\alpha$ -carburo de silicio utilizado también como partícula esmeriladora de forma romboédrica y hexagonal, y además el  $\beta$ -carburo de silicio de forma cúbica.

La estructura cristalina del carburo de silicio pertenece al sistema regular del tipo esfalerito ( $ZnS-T_d$ ). Su estructura se puede considerar como dos cubos centrados en sus caras los cuales se encuentran separados uno del otro a una distancia de un cuarto de su diagonal. Los átomos de silicio (111) se encuentran ubicados de la forma más apretujada en los lugares denominados por ABC en redes planas, con éstas se coordinan las redes de carbono de estructura semejante, de tal manera que (111) se encuentran separadas en las  $3/4$  partes de la distancia fundamental del cristal (Z) en dirección de la normal al plano (111). Así las puntas de los tetraedros de silicio se encuentran en los centros de gravedad de los tetraedros del carbono, y las puntas de los tetraedros de carbono en los centros de gravedad de los de silicio. De manera que la estructura ordenada del SiC está formada por planos dobles de Si—C que se siguen unos a otros en las posiciones designadas con ABC. Al  $\alpha$ -carburo de silicio se le conocen más politipos. Estos se diferencian del  $\beta$ -SiC y entre ellos, por la ordenación de sus capas dobles. En la ordenación de sus capas, dos capas representadas por las mismas letras no pueden seguir una a la otra. El número de los politipos es grande; hasta ahora ya han descubierto más de treinta.

Los politipos más importantes que se pueden encontrar en el carburo de silicio técnico, los presenta la figura 98/b.



*Fig. 99.* a) Superficie de la partícula de carburo de silicio (1) cubierta con una capa del material de enlace cerámico (2) (900×)  
 b) Exposición de la superficie pulida de una piedra de esmeril integrada por partículas de carburo de silicio con enlace cerámico bajo microscopio óptico con huellas de las mediciones de microdureza (700×)  
 1 partícula de carburo de silicio, 2 material de enlace, 3 huella de la medición de microdureza, 4 poro de aire



*Fig. 100.* Exposición con microsonda del límite de fase de una partícula de carburo de silicio (1) y del material de enlace cerámico (2)  
 a) Distribución lineal de la intensidad de los rayos electrónicos con los lugares de medición (1800 $\times$ )  
 b) Distribución lineal del contenido de Si  
 c) Distribución lineal del contenido de Al

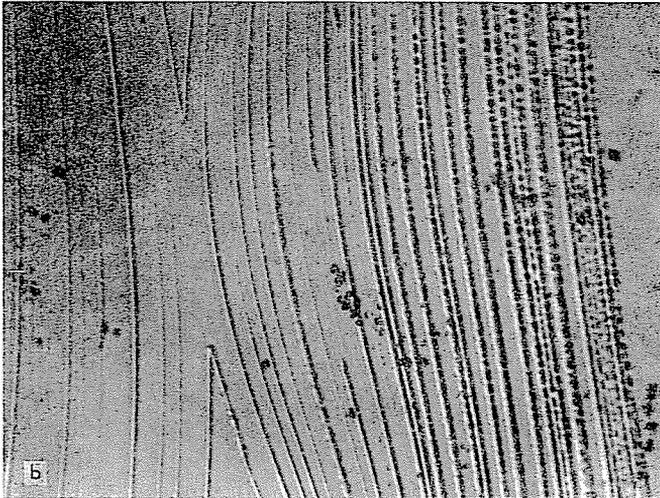
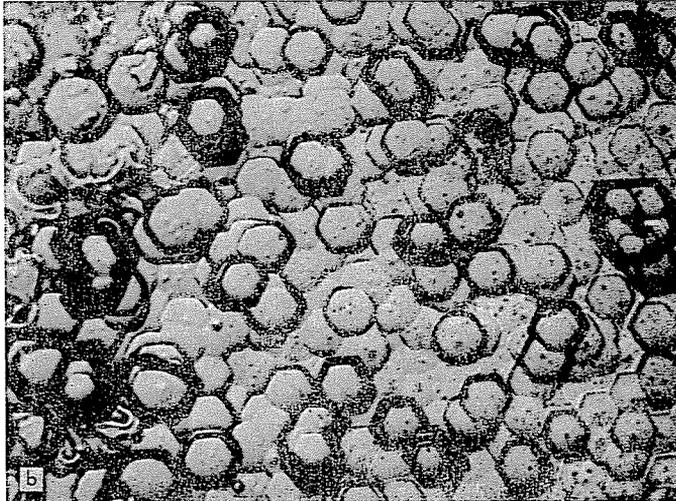
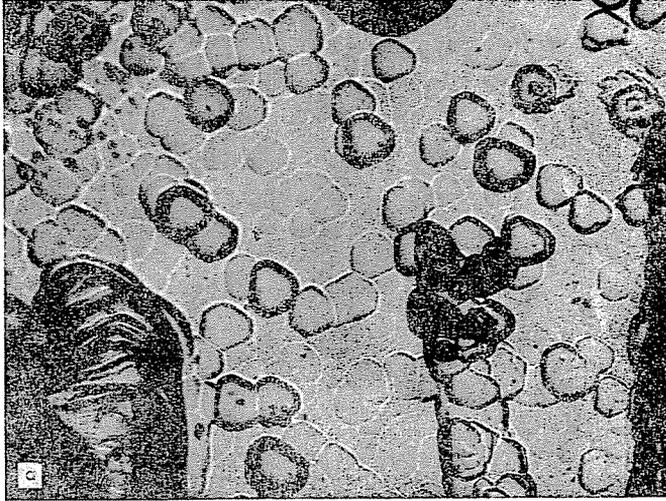
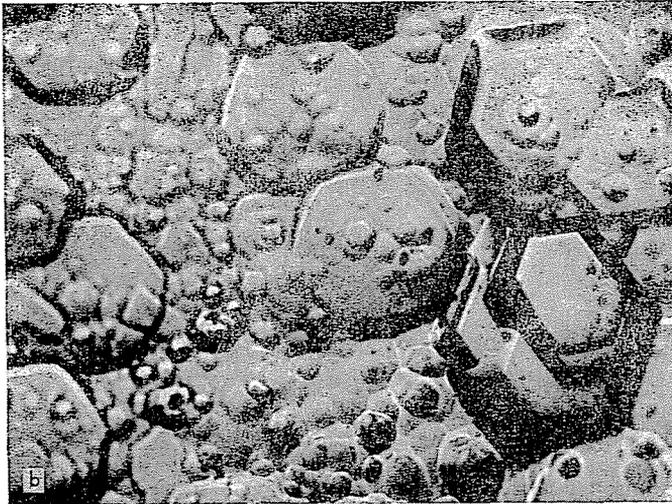


Fig. 101. Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada  
a) (300×)  
b) (300×)



*Fig. 102.* Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada  
a) (300×)  
b) (300×)



*Fig. 103.* Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada

a) (300×)  
b) (600×)

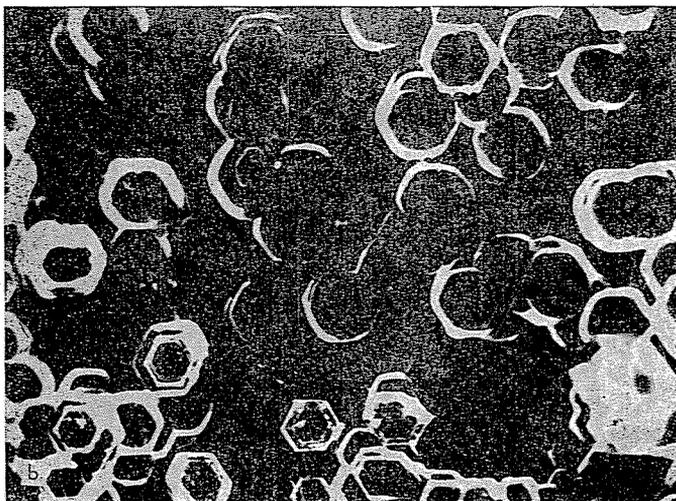
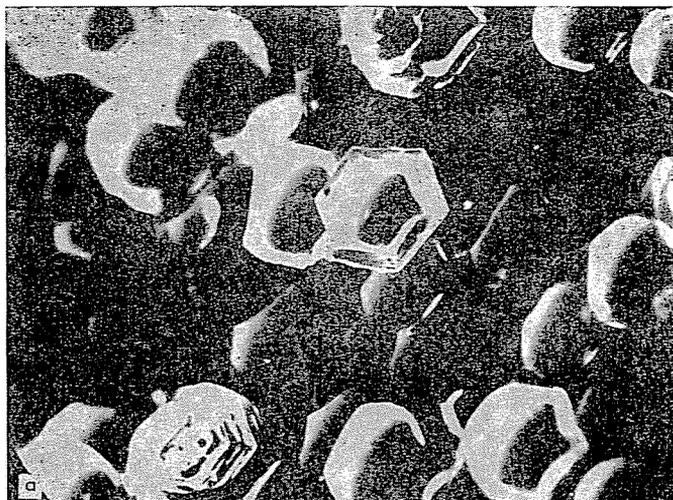
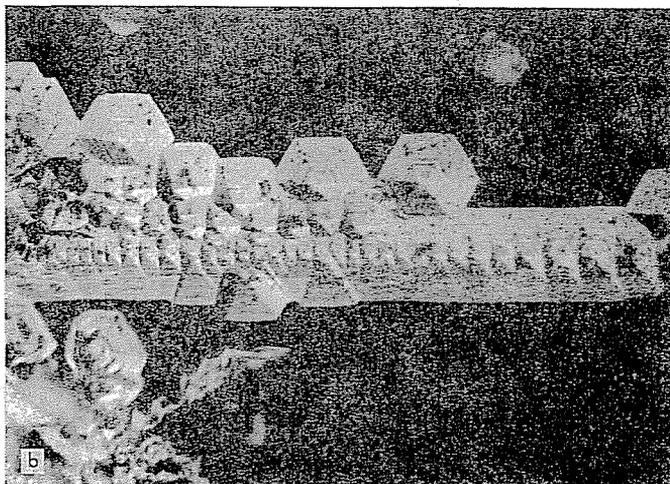
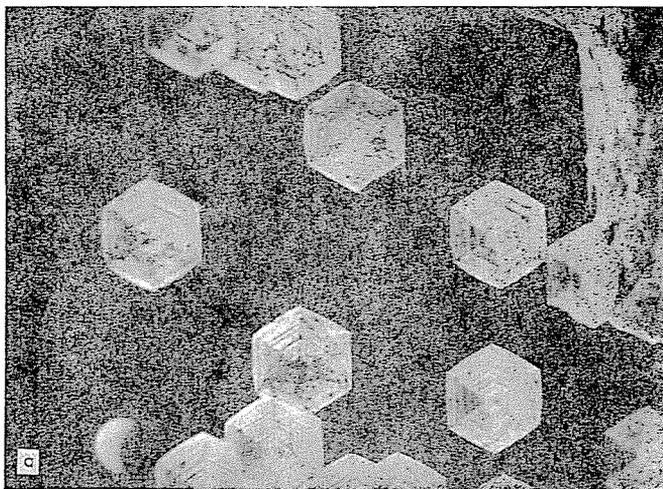


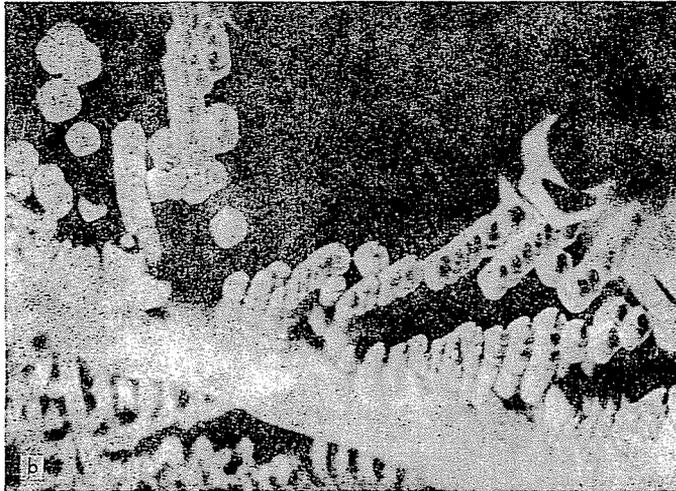
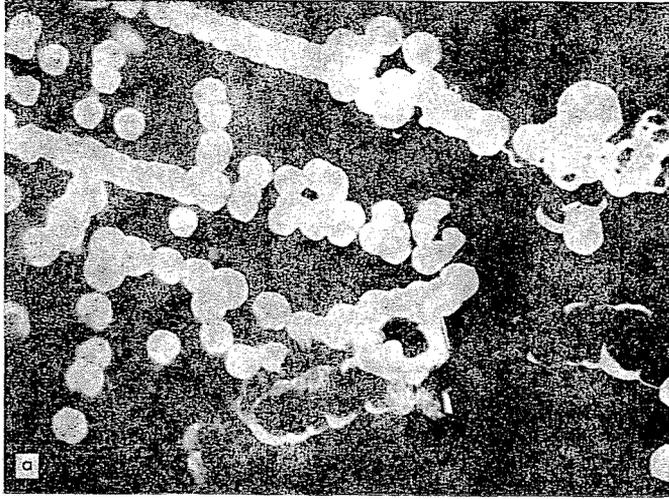
Fig. 104. Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada

a) (300×)

b) (300×)



*Fig. 105.* Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada  
a) (300×)  
b) (300×)



*Fig. 106.* Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada

a) (300×)

b) (300×)

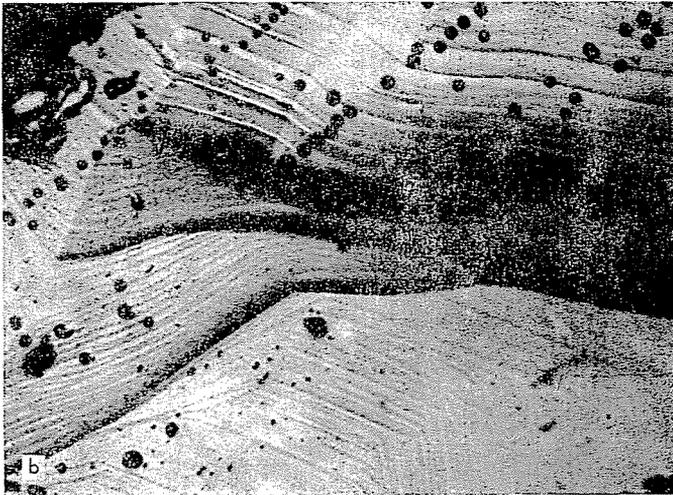


Fig. 107. Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada  
a) (300×)  
b) (300×)

La gran variedad de la estructura cristalina del carburo de silicio implica una gran diferenciación de sus propiedades. En los últimos tiempos se lo conoce como el compuesto inorgánico más complejo.

*9. La interacción entre la partícula esmeriladora de carburo de silicio y el material de enlace cerámico*

9.1. Mientras que en el límite de fase entre el material de enlace y las partículas de corindón aparece una capa de enlace de espesor que alcanza en ocasiones hasta  $100\ \mu\text{m}$ , la misma que se puede estudiar muy bien debido a la

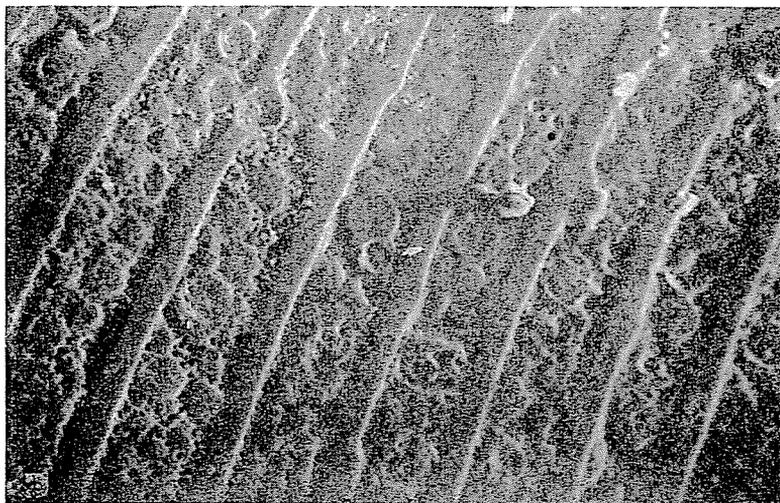
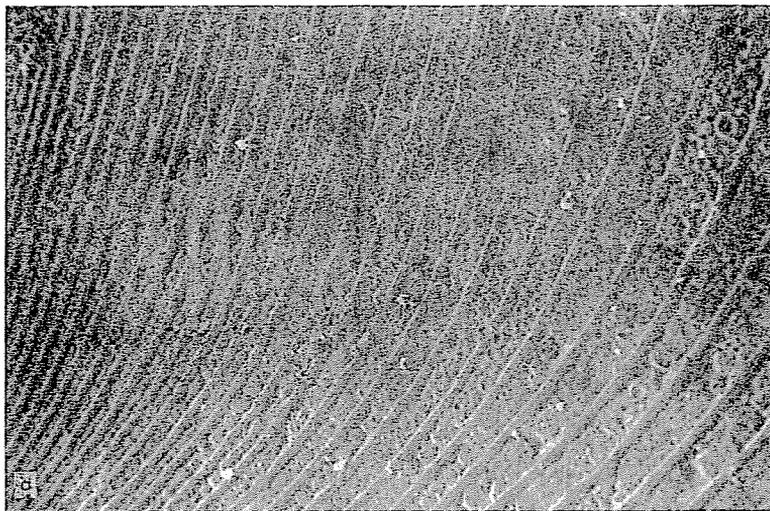




Fig. 108. Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada  
 a) (300×)  
 b) (300×)

acción reveladora del material de enlace amorfo a grandes temperaturas, en el caso del carburo de silicio la capa de enlace apenas tiene algunos  $\mu\text{m}$  de espesor. Para enlazar al carburo de silicio no se puede utilizar materiales de enlace de tipo amorfo, ya que estos, durante el proceso de cocción, descomponen al SiC; solamente se puede contar con la utilización de materias primas que se apelmazan en forma de porcelana. La figura 99/a muestra la adhesión del material de enlace de tipo porcelana. La figura 99/b presenta las huellas, prácticamente de idénticas proporciones, de las mediciones de microdureza que muestran también la invariabilidad de las propiedades del material de enlace en las proximidades de los límites de fase, sin que surja una capa de transición de diferente composición que se pueda detectar mediante este método.

9.2. Para la caracterización más exacta del límite de fase entre el carburo de silicio y el material de enlace, de manera similar que en nuestras muestras de las partículas de corindón, tomamos a los componentes fundamentales del sistema. En la figura 100. se puede observar que la curva de distribución a través de la línea del aluminio y el silicio que muestra la variación de concentración muy abrupta de la capa de enlace es muy inclinada y que éste método no es sensible para detectar la capa de enlace, debido a la pequeña anchura de la misma.

9.3. Debido a la estructura variada y completa del carburo de silicio (sobre la cual ya hemos hablado anteriormente), la textura microcristalina de

las partículas de carburo de silicio se diferencia fundamentalmente de la del electrocorindón y no se puede examinar por los métodos que aplicamos en el caso del electrocorindón. Las características morfológicas de la superficie del carburo de silicio utilizado para esmerilar, las analizamos luego de la corrosión provocada con ácidos. Aunque la corrosión provocada brinda su aporte en los estudios del mecanismo del crecimiento de los cristales y de la morfología de los cristales únicos, nosotros la utilizamos para obtener información indirecta y orientarnos sobre el comportamiento frente a los distintos reactivos químicos y sobre las reacciones esperadas frente a los materiales de enlace de diversos

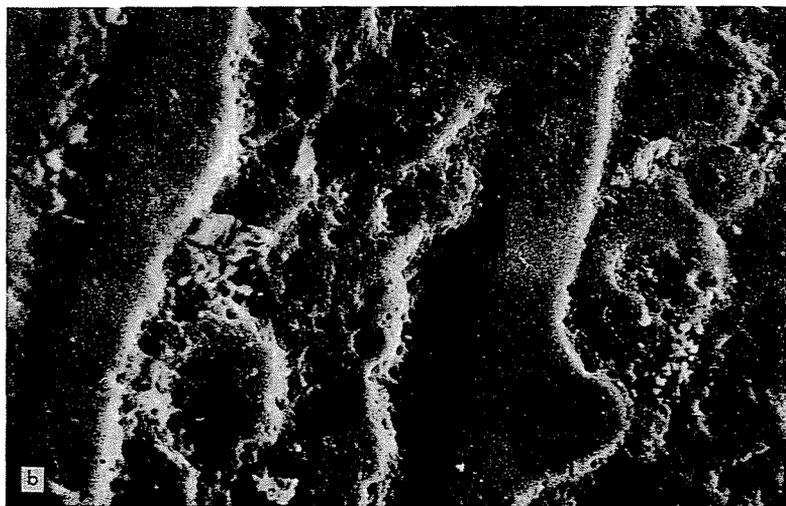
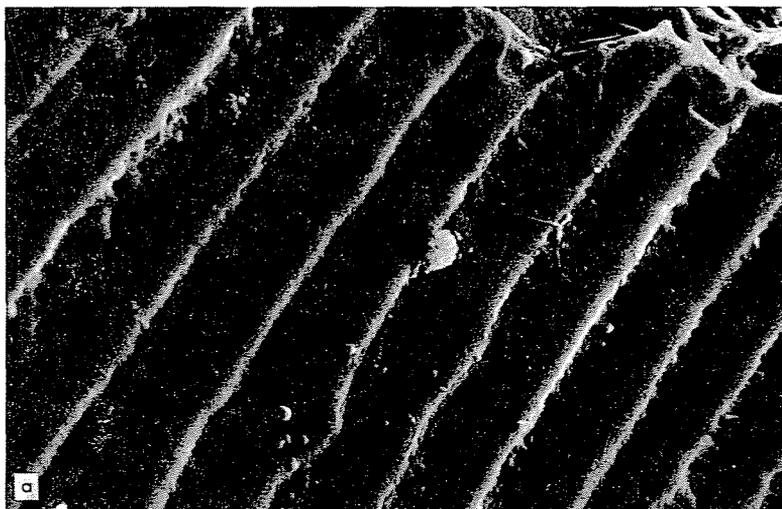
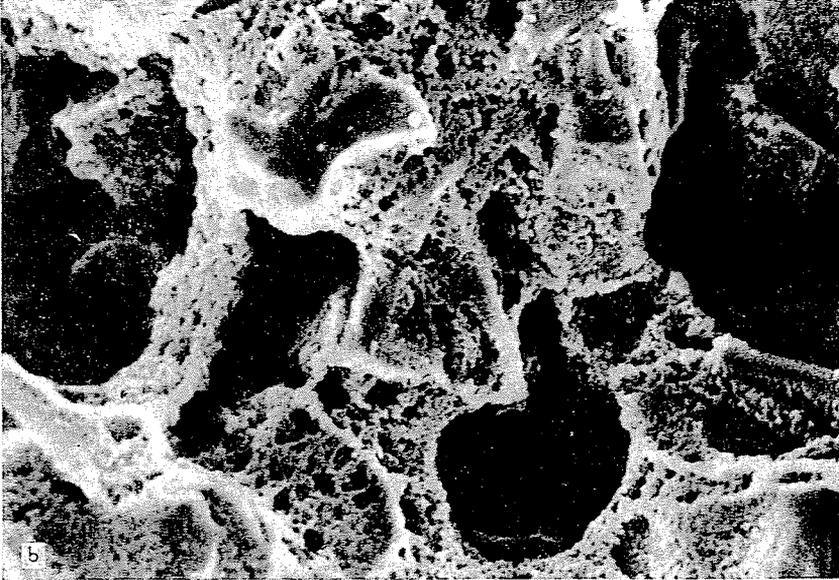
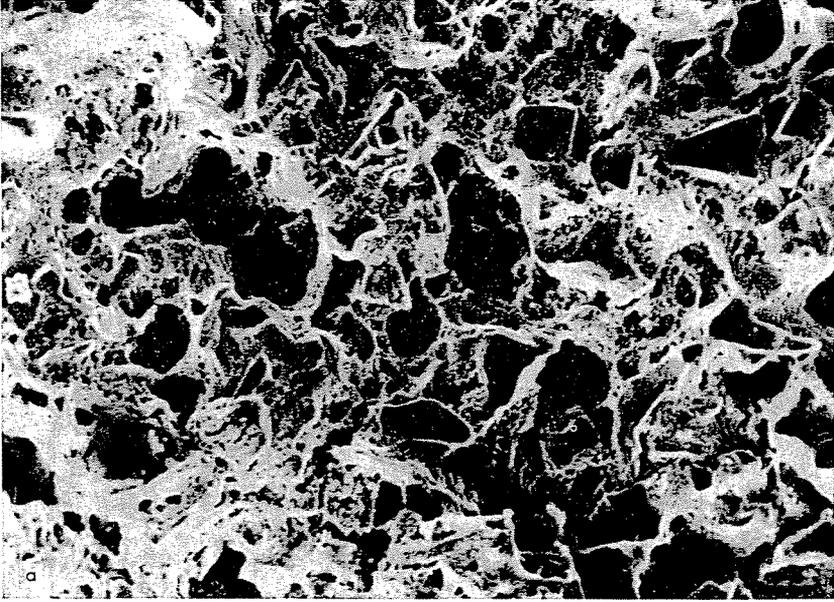




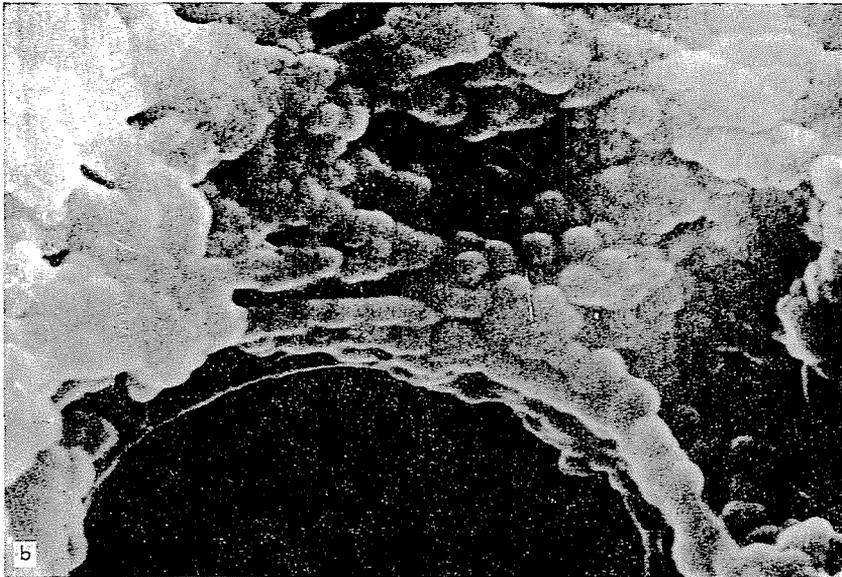
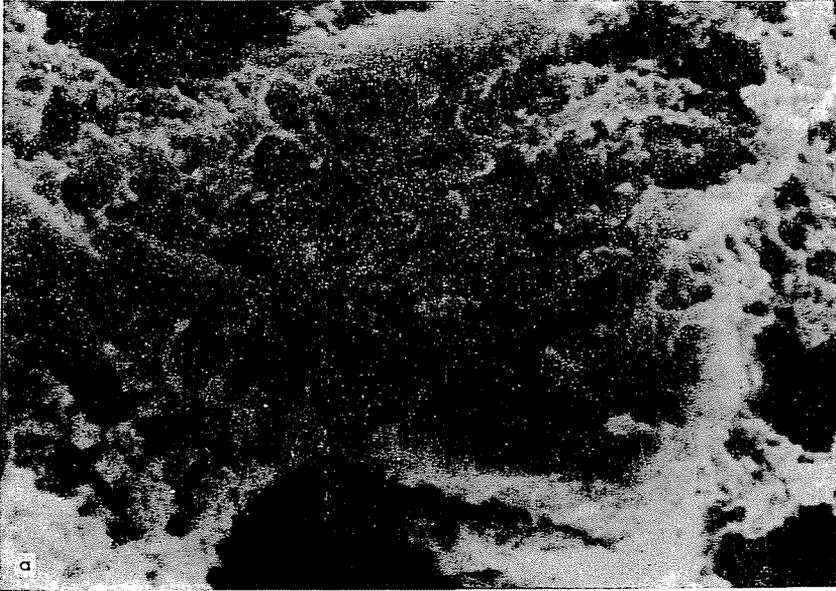
Fig. 109. Exposiciones realizadas bajo microscopio óptico de la superficie de la partícula de carburo de silicio después de haber llevado a cabo su corrosión provocada  
 a) (300×)  
 b) (300×)

tipos y diversas características químicas. Hay que anotar que las figuras 101—109., las mismas que mediante fotos tomadas con microscopios ópticos presentan las formaciones de zonas cristalinas poligonizadas y vaciados realizados mediante la corrosión provocada de diversas formas, junto a distintas inhomogeneidades, en nuestro caso no representan informaciones que se puedan utilizar directamente, ya que el proceso de enlace de la partículas de carburo de silicio es sumamente complejo y aún hoy no ha sido aclarado en ninguna bibliografía. El objetivo de nuestras investigaciones en la presente etapa no llega a la profundización de las investigaciones en lo referente a este problema. Debido a la complejidad del comportamiento y la estructura del carburo de silicio, sobre lo que ya hemos hablado anteriormente, su enlace se realiza, aún en la actualidad y a nivel mundial, basándose en las experiencias obtenidas mediante métodos empíricos.

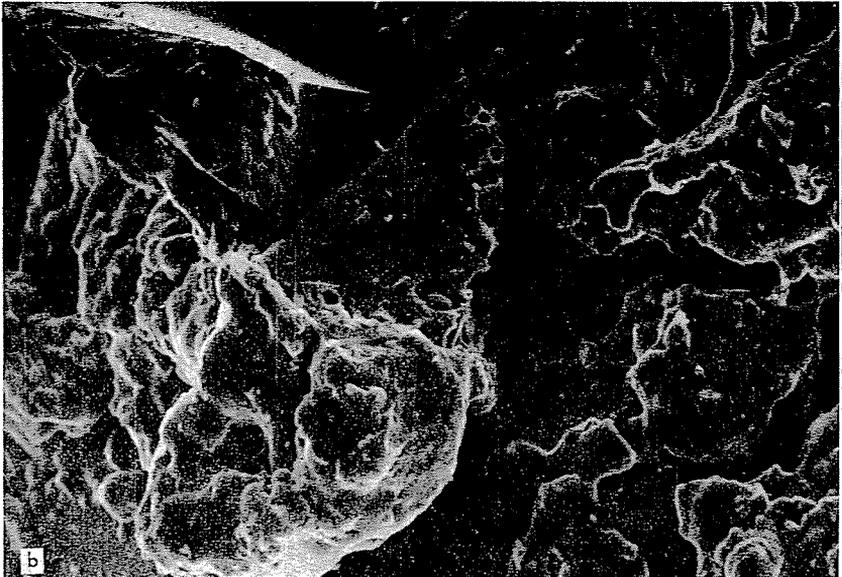
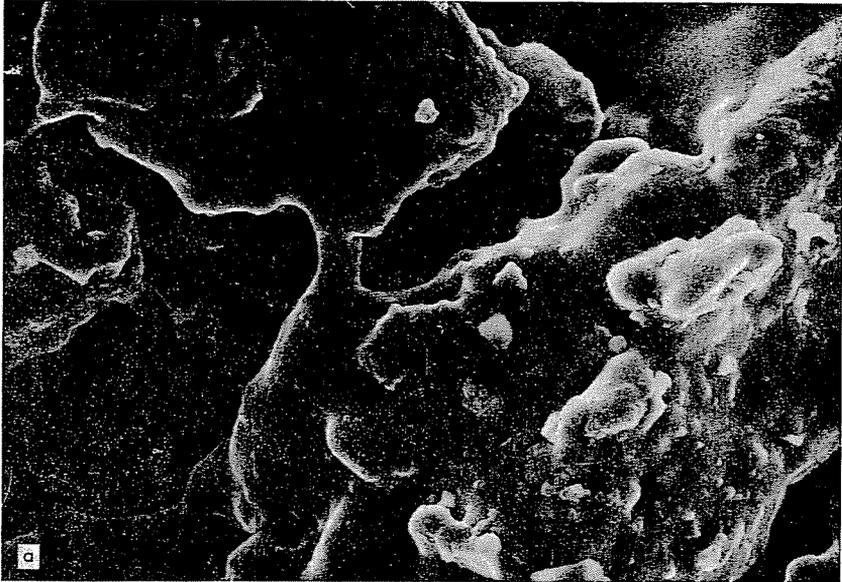
9.4. La ubicación de las partículas de carburo de silicio en el material de enlace y la conexión entre sí de las cubiertas del material de enlace, se diferencian del caso de las piedras de esmeril con partículas de corindón, debido a la poca semejanza de la naturaleza del material de enlace. El material de enlace que no se funde con facilidad y se concentra durante la cocción, no produce una capa continua en las partículas de carburo de silicio (figuras 110., 111/a, 112/a, 113.). En la micromorfología de los puentes del material de enlace que une las partículas de carburo de silicio, se refleja también el carácter no amorfo (figura 111/b) de las partículas de carburo de silicio de enlace cerámico. Esta última figura presenta plásticamente la textura microcristalina del material



*Fig. 110.* Estructura de las piedras de esmeril con partículas de carburo de silicio y enlace cerámico hecha bajo microscopio electrónico de tipo scanning  
a) (700 $\times$ )  
b) (2500 $\times$ )

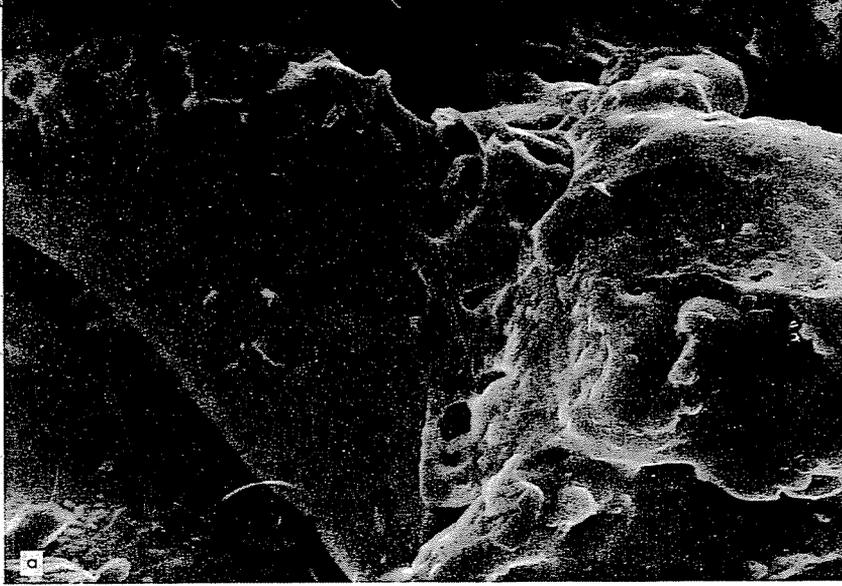


*Fig. 111.* Estructura de las piedras de esmeril con partículas de carburo de silicio y enlace cerámico hecha bajo microscopio electrónico de tipo scanning  
a) superficie de una partícula cubierta con material de enlace (8000 $\times$ )  
b) microestructura de un puente del material de enlace cerámico (23 000 $\times$ )

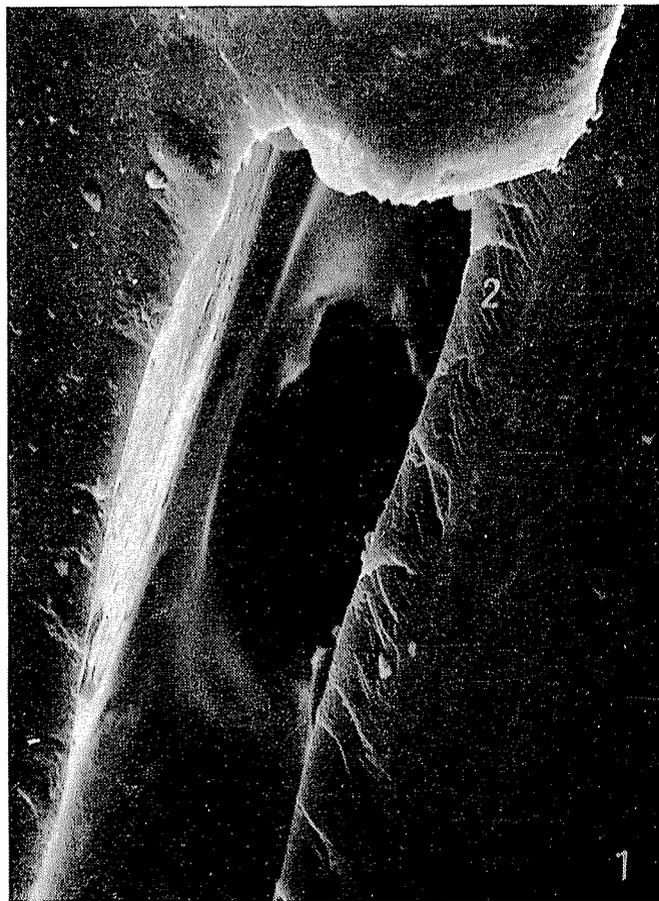


*Fig. 112.* Estructura de las piedras de esmeril con partícula de carburo de silicio y enlace cerámico hecha bajo microscopio electrónico de tipo scanning

- a) enlace entre las partículas cubiertas con material de enlace ( $12\,500\times$ )  
b) superficie de fractura entre el carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) ( $600\times$ )



*Fig. 113.* Exposiciones tomadas bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2)  
a) (1200×)  
b) (3500×)



*Fig. 114.* Exposición tomada bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) (9000 $\times$ )



*Fig. 115.* Exposición tomada bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) (10 000 $\times$ )



*Fig. 116.* Exposición tomada bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) (6000×)



*Fig. 117.* Exposición tomada bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) (26 000×)



*Fig. 118.* Exposición tomada bajo microscopio electrónico de tipo scanning del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) (10 000×)



*Fig. 119.* Exposición hecha bajo microscopio electrónico del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) (26 000×)



Fig. 120. Exposición hecha bajo microscopio electrónico del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (1) y el material de enlace cerámico (2) (54 000×)



Fig. 121. Exposición hecha bajo microscopio electrónico del límite de fase entre la partícula de carburo de silicio (16) y el material de enlace cerámico (2) (26 000×)

de enlace y su forma de enlace. Entre las fotos tomadas con el microscopio electrónico de scanning las figuras 113. y 118., que presentan fracturas de la superficie y las relaciones del enlace "bajo la superficie", son muy instructivas.

9.5. El microscopio electrónico se presta para la reproducción con mayor precisión de los límites de fase (figuras 119. a 121). En las exposiciones, debido a la diferencia de las texturas, se puede determinar de forma indiscutible cuál es la fase de carburo de silicio y cuál la del material de enlace. Entre estas dos fases se puede distinguir, en todos los casos, la capa de enlace morfológicamente diferenciable, la misma que asegura el enlace debidamente sólido. Comparando la anchura de esta capa con las capas de transición de los sistemas de material de enlace cerámico-electrocorindón ya presentados, nos percatamos de que en el caso del carburo de silicio esta capa sólo alcanza algunos micrones. La capa de enlace, según los datos bibliográficos, durante el proceso de cocción se forma de la siguiente manera: primeramente el material de enlace oxida la capa superficial del carburo de silicio a  $\text{SiO}_2$ , y a esta capa fina se adhiere el material de enlace. Esta suposición no la hemos podido demostrar todavía experimentalmente. En la figura 120, se puede observar bien la transformación micromorfológica de las inmediaciones del límite de fase del material de enlace.

Como parte del objetivo de nuestras futuras investigaciones nos hemos trazado la meta de continuar los exámenes del proceso de enlace de las piedras de esmeril a base de partículas de carburo de silicio.

### Resumen de todo el trabajo realizado

I. El esmerilado es el método de acabado más moderno y de mayor desarrollo dinámico a nivel mundial. La mayoría de las piedras de esmeril se elaboran a partir de partículas de electrocorindón y de carburo de silicio con enlace cerámico, pues este tipo de enlace asegura el mayor número de ventajas en su utilización.

II. El conocimiento de las relaciones entre la microtextura y las propiedades más importantes de las piedras de esmeril, es la condición de la modernización de la técnica de esmerilado actual y de la fabricación de piedras de esmeril de adecuado rendimiento, y que responde tanto a las exigencias técnicas como económicas.

III. Teniendo en cuenta las condiciones de la utilización, planifiqué y realicé la investigación compleja de la teoría técnica y tecnológica de la fabricación de las modernas piedras de esmeril.

IV. Lo fundamental de la fabricación de piedras de esmeril, basándome en la parte teórica y práctica de mis investigaciones, lo dí a conocer detalladamente en dos monografías y lo resumí en forma de tesis.

V. He demostrado tanto práctica como teóricamente que la utilización práctica, la compleja valorización, microtextura, relacionadas con la utiliza-

ción y tecnología de fabricación, de las proporciones y disposición espacial, de las propiedades de las fases amorfas y cristalinas que edifican a las piedras de esmeril de enlace cerámico, significan las bases de la modernización del uso y fabricación de las mismas.

### Conclusiones

La base del presente trabajo resumen y los resultados científicos presentados detalladamente en mis dos monografías han sido creados dentro del marco de la cooperación de amplios círculos, tanto húngaros como internacionales. Debido al carácter de región fronteriza, a la diversidad de las tareas a resolver, y a la necesidad de utilizar métodos e instrumentos modernos en la resolución de dichas tareas, desde el principio he buscado y encontrado especialistas en dichos terrenos, tanto húngaros como extranjeros, así como instituciones que con su ayuda sabia han cooperado en la realización de mi trabajo.

Nombrar a todos los que de una forma u otra dieron su aporte en esta empresa no cabe en este pequeño espacio; en su lugar quiero recordar algunas fases de mi trabajo investigativo y nombrar como ejemplos a varias instituciones.

La valoración real de especialistas, como el director del "Instituut voor Werktuigkunde" y mis compañeros de trabajo durante mis estudios realizados en 1969—1970 en la Universidad de Leuven de Bélgica, sobre los resultados de mis trabajos científicos obtenidos hasta el momento, además del apoyo moral y material brindado por ellos en la realización de los objetivos de mis investigaciones, llevaron adelante mi trabajo en gran medida.

Pusieron a mi alcance los más modernos instrumentos para examinar la dureza y la microestructura. Numerosos datos importantes sobre las partículas esmeriladoras de electrocorindón y de carburo de silicio así como de los materiales de enlace cerámicos, los encontré en los trabajos del VNIAS (Instituto Central de Investigaciones Científicas de la Industria de Herramientas Esmeriladoras y Técnica de Esmerilado, Leningrado).

Entre los métodos modernos del examen de la microestructura, en 1960 conocí en Europa uno de los primeros microanalizadores roentgenográficos con rayos electrónicos, instalado en "Chalmers Tekniska Högskola" (Göteborg). Estos exámenes más tarde fueron continuados con la microsonda instalada en el Instituto de Investigación y Planificación de la Industria de los Silicatos. Numerosas exposiciones realizadas con la microsonda se efectuaron en los laboratorios de la Compañía Electrónica-Optica Japonesa (JEOL) ubicados en París y Tokio. Las investigaciones sistemáticas con la microsonda fueron basamentadas en la Cátedra de Petrografía de la Universidad de Leuven. La mayor parte de los exámenes fueron realizados en los laboratorios de Geoquímica de la Academia de Ciencias de Hungría. Nuestros primeros

exámenes de prueba, con el microscopio electrónico scanning, fueron efectuados en los ya nombrados laboratorios de la JEOL, luego se realizaron en Zentrum für Elektronenmikroskopie (Graz) y después de esto continuaron realizándose en la Universidad de Leuven. En la actualidad nuestras investigaciones se llevan a cabo en los microscopios electrónicos de la Universidad de Ciencias Eötvös Loránd en las Cátedras de Anatomía Comparativa y de Zoología General de la Facultad de Ciencias Naturales, en la Cátedra de Química Analítica y General de la Universidad Técnica de Budapest, y en la Universidad de la Industria Química de Veszprém.

Ya hace más de 12 años que realizamos buena parte de las investigaciones en cooperación con el microscopio electrónico ubicado en los Laboratorios Centrales de Exámenes de Materiales en la Fábrica de Metales y Hierro de Csepel.

Las determinaciones del módulo de elasticidad mediante mediciones del aumento longitudinal, a principios de los años 1960 ocurrieron dentro de los marcos de la cooperación con el Instituto de Desarrollo de Herramientas y Maquinarias. El método rápido y que no destruye la muestra durante el examen y determina el módulo de elasticidad mediante hondas sonoras, fué desarrollado por la Universidad de Leuven, siendo conocido el instrumento con el nombre de "Grindo-Sonic".

A fines de los años 60 examinábamos ya aquí las muestras, luego las hacíamos examinar. Entretanto, el Instituto Tecnológico de la Industria Maquinaria, perfeccionó el instrumento examinador del módulo E, basado en la frecuencia del sonido.

Las mediciones de difracción roentgenográficas y sus valorizaciones fueron realizadas en el Instituto Central de Investigaciones Químicas de la Academia de Ciencias Húngara, con la ayuda del Profesor Náray-Szabó István.

El desarrollo de algunas partes del método de examen con microscopios ópticos, fué llevado a cabo por el Instituto Estatal Húngaro de Suelos. Las pruebas de la elaboración a nivel industrial se llevaron a cabo en las fábricas de la Industria Húngara de Silicatos.

Profesor Dr. Miklós MOSER, H-1521 Budapest Hungría

### Sumario

La publicación recapitula los más importantes resultados de investigación dados a conocer en dos monografías anteriores (Kerámiai kötésű köszőrúszerszámok [Piedras de esmeril de enlace cerámico]), (Microstructures of Ceramics [Microstructure and properties of grinding tools]), publicadas por la Editorial Academia, Budapest, en 1971 y 1980 respectivamente.

Las cerámicas tomadas en sentido general, en el material del modelo más típico de las mismas, en las piedras de esmeril de enlace cerámico, muestran las relaciones de los problemas generales y especiales tanto teóricos como técnicos y tecnológicos de la investigación del material sólido.