

Mosaico de teselas de ópalos mexicanos Ejercicios de pulido lapidario de obsidiana

[Roberto Velázquez Cabrera](#)

23 de junio de 2015



Fig. 1. Mosaico de teselas de ópalos. Largo 62 mm, ancho 30 mm y grueso 4 mm.

El objeto principal de este escrito es comentar los resultados de los análisis realizados al hermoso mosaico de teselas de ópalos sobre obsidiana de la Fig. 1¹, que hace muchos años, me dio mi hermano Manuel (finado). Me dijo que fue hecho en Magdalena, Jalisco, pero no quién lo hizo ni cómo. Es una maravilla lapidaria. Se ve que está muy bien trabajado y terminado. También se comentan algunos beneficios resultantes de los trabajos realizados de lijado y pulido lapidario de obsidiana, como el de ayudar a definir y probar protocolos de laboratorio para preparar superficies de muestras de baja rugosidad con calidad de espejo, como los requeridos en los estudios de espectroscopia de la [Sección de Electrónica del Estado Sólido del CINVESTAV](#).

¹ Los estudios lapidarios del autor son un modesto homenaje póstumo a Adolphus Langenscheidt (1931-1909), porque se interesó en los trabajos sobre esa extraordinaria y fina tecnología mexicana y es el único que publicó escritos sobre [Los abrasivos en Mesoamérica](#). También publicó escritos sobre [Lapidaria mesoamericana](#) y otros temas relacionados de [Minería prehispánica en México](#).

En estudios independientes, como los del suscrito, es difícil tener acceso directo a piezas pulidas arqueológicas o históricas, como los espejos de obsidiana y mosaicos de otros materiales lapidarios existentes en museos y colecciones, y a microscopios y otros equipos científicos costosos para caracterizarlas y analizarlas con profundidad y formalidad, como los electrónicos de barrido (MEB). Este ejercicio muestra que aun con esas grandes limitantes existentes es posible hacer estudios originales, hasta a partir de una pieza artesanal reciente con superficies de pulido fino como de espejo, aunque pueden hacerse ejercicios similares mejorados con piezas arqueológicas y utilizando equipo científico de laboratorio adicional, si son accesibles para ello.

Ya se ha comentado que las hermosas y singulares obras tecnológicas mexicanas, aunque sean recientes, como ese hermoso mosaico, son importantes y deberían ser examinadas en laboratorios científicos. Las antiguas recuperadas, también deberían ser analizadas formalmente. El análisis del mosaico es un ejemplo de eso².

En la fotomicrografía de la Fig. 2, se muestra la vista superior de un grupo de las teselas de ópalo pegadas a una base delgada de obsidiana. Fue tomada con mi camarita digital³, que fue adaptada con un tubo de hule a un microscopio óptico bifocal Nikon SMZ-1 (magnificación 3x - 99x). Para dar una idea de las dimensiones de las teselas y sus finas uniones, se incluye la punta de una aguja y un cabello humano (cana). El grosor medio del cabello en un adulto se sitúa en unas 70 μm (0.070 mm). La cana también sirvió para enfocar la superficie negra de la obsidiana.

El trabajo lapidario para cortar, ajustar y ensamblar cada una de las teselas delgadas (<1 mm) debió ser muy delicado y cuidadoso. El pulido también es muy fino, como de un espejo, ya que a esa amplificación no se observan rastros de ralladuras largas del lijado en la superficie. Las pocas rayas microscópicas que aparecen en la superficie pueden ser posteriores al pulido, porque son muy cortas.

En la fotomicrografía de la Fig. 3, tomada con el mismo microscopio y con las referencias comparativas de escala, se muestra la superficie de la cara posterior de la base de obsidiana. Su pulido superficial también es muy fino ya que no se observan rayas microscópicas largas en la superficie. Las uniones con pegamento gris, son delgadas. En la fotomicrografía de una vista lateral de la pieza (Fig. 4) se muestra que el grosor de las teselas de ópalo es similar que el de la aguja y el pegamento de las uniones también es muy delgado.

Las superficies de la pieza se analizaron en el Laboratorio SIMS (*Secondary Ion Mass Spectrometry*) de la Sección de Electrónica del Estado Sólido del CINVESTAV, con la ayuda excepcional del Dr. Yuriy Kudriavtsev y la maestra Georgina Ramírez.

² El análisis se inició a fines de 2014 y los principales trabajos experimentales se realizaron en 2015.

³ Kodak Easy Share DX 4530

Las huellas lapidarias manométricas de la pieza fueron examinadas con un equipo científico especial que utilizan para examinar y caracterizar perfiles superficiales de materiales sólidos muy lisos o pulidos (con una punta de diamante del equipo *Dektak XT stylus profiler* $<4\text{Å}$ o $<0.4\text{nm}$), aunque ninguna superficie trabajada es realmente plana en la dimensión de los nanómetros. En la Fig. 5 se muestra el perfil topográfico de un segmento de la superficie de obsidiana pulida. Se encontró que su rugosidad R_q (promedio de la diferencia entre los picos o lomas y los valles o canales)⁴ de la sección de R a M, es del orden de los nanómetros (33.2 nm o 332 Å), que es muy fino para un lijado y pulido lapidario. A esa dimensión se conocen los detalles moleculares de los materiales. Ese es el tipo de rugosidad fina que requieren en el Laboratorio SIMS.

La escala de la rugosidad en nm de la superficie mostrada en la Fig. 5 fue muy amplificada, en relación a la distancia analizada de R a M es de 0.29 mm, ya que su escala en el eje “y” está muy comprimida, porque es igual a 290000 nm⁵. La longitud en el eje “x” del perfil graficado de la obsidiana es de 500000 nm o 0.5 mm.

Ese tipo de perfil de contacto caracterizado es una de las mejores formas existentes conocidas para mostrar la topografía cuantificada, con el ancho y profundidad de las rayas remanentes en la superficie pulida, e indica algo de las dimensiones y morfología de los cortadores o abrasivos y pulidores que las generaron lapidariamente.

La Fig. 6 muestra la fotomicrografía con un detalle de la unión de unas teselas de ópalos, para mostrar su dimensión reducida, que es del orden de las μm . El detalle de la unión se registró con el mismo equipo *Dektak XT stylus profiler*.

Una forma macro sencilla de probar la efectividad óptica de una superficie pulida, es observando de cerca su capacidad para reflejar una imagen como espejo, como lo hizo Lunazzi en [Olmec mirrors an example of archaeological American mirrors](#). En la Fig. 7 se muestra la imagen de dedos reflejados en la superficie pulida de la base de obsidiana, aunque no fue trabajada con la finalidad sustantiva de los espejos. La imagen mostrada de dedos es un poco borrosa, por el tipo de cámara usada, aunque el color cercano al real indica la poca rugosidad lograda en la superficie reflejante.

Otra forma sencilla de probar el pulido fino de una superficie es observando el reflejo del haz de luz de una lamparita láser en una pared o superficie blanca o clara un poco alejada en distancia y oscura, comparada con la imagen de la luz láser directa. Si la imagen de la luz se deforma mucho o es menos nítida, indica que la superficie no está bien pulida, aunque es difícil encontrar una que no tenga alguna rugosidad e influye la distancia de la lamparita, el ángulo de reflexión y la limpieza de la superficie, y la mayor

⁴ $R_q = [1/N \sum z_i^2]^{1/2}$ = promedio de la raíz cuadrada de las desviaciones al cuadrado.

⁵ 1 mm = 1000000 nm

parte de la luz se absorbe en el interior de la obsidiana. También puede usarse la luz del sol, pero su haz reflejado se dispersa con la distancia.

Es posible percibir los surcos o huecos de una superficie hasta de lijadas de grado medio con abrasivos de dimensión de micras, si se frota con una uña. Como una superficie alisada fina con R_q de nm, como la de un espejo, ya no puede percibirse, es otra manera de probar su poca rugosidad, aunque es mejor usar un buen microscopio con luz lateral rasante, para poder observar un pulido sin rayas o rayas finas.

Ya se ha comentado que las tecnologías científicas actuales, pueden servir para analizar las tecnologías antiguas y etnológicas, artesanales y de talleres actuales y, a la inversa, el estudio de éstas puede ayudar a las investigaciones científicas futuras.

El SIMS ya se ha utilizado para analizar y datar obsidiana con el método de hidratación⁶, aunque ocurren transformaciones químicas de sus elementos. Las técnicas científicas para analizar perfiles, también pueden servir para examinar huellas de abrasión, como el pulido lapidario en piezas antiguas. En el otro sentido, el analizar las técnicas lapidarias de las teselas de ópalo y su base de obsidiana, como su lijado y pulido fino, pueden aprovecharse para preparar muestras pequeñas con las superficies requeridas de rugosidad manométrica en los trabajos de investigación sobre electrónica del estado sólido y para el estudio de las piezas arqueológicas con la técnica SIMS y otras de microscopía que requieren superficies pulidas como espejo. Eso es importante, para poder establecer protocolos necesarios para la preparación de las muestras, usando los materiales abrasivos disponibles en el mercado local, ya que no se han encontrado análisis de ellos con técnica de microscopía o espectroscopía.

También, ya se ha mostrado que vistas de perfiles de los cortes finos de rocas pueden servir para conocer la forma de las herramientas y materiales usados, a nivel macro en [cortes de una roca maya](#) y milimétrico en [cortes finos de rocas preciosas](#), pero las técnicas comentadas en este ejercicio pueden ser usadas a nivel manométrico, como se muestra en la Fig. 5.

Entre los descubrimientos más relevantes sobre los cortes manuales finos de rocas como la turquesa, se encontró que pueden realizarse con arenas finas como unas de cuarzo, arrastradas con cuchillos delgados de carrizo y agua. También pueden usarse cuerdas delgadas de fibras de agave, para arrastrar los granos abrasivos. Esos descubrimientos se dieron a conocer en el informe de un estudio sobre [Teselas de turquesa de mosaicos mexicanos](#). Su [texto en inglés](#), fue hecho para Ian Mursell de [Mexicolore](#), que incluye un [resumen con una liga al texto en inglés](#).

⁶ Obsidian Hydrating Dating by Using SIMS: Current Results, Problems, and Perspectives. Yu. Kudriavtsev, S. Gallardo, M. Avendaño, G. Ramírez, R. Asomoza, L. Manzanilla IV Congreso Latinoamericano de Arqueometría, México, 2014

Técnicas similares pueden aplicarse para hacer teselas experimentales de varios tipos de rocas, como las de los espejos de pirita, pero esa roca es más dura (6 – 6.5 Mohs) y puede ser cortada con otros cuchillos finos, como los de metal. Por ejemplo, en tres horas, se hizo un [corte manual de 2 mm de profundidad en una roca de pirita](#), con una lámina delgada de cobre y arena fina de cuarzo como abrasivo.

Muchas otras piezas líticas antiguas como los chalchihuites (rocas verdes y azules que fueron de alto valor y muy apreciadas, pudieron aserrarse con métodos similares), pero la arena abrasiva debió ser más dura como el diamante (10 Mohs), corindón (9 Mohs), esmeril (7-9 Mohs) o topacio (8 Mohs) para poder cortar en poco tiempo rocas duras como la jadeita (7 Mohs) y el cuarzo. Los métodos antiguos del trabajo lapidario local de la jadeita y el cuarzo son un misterio a explorar y probar con la experimentación. No han encontrado polvos de diamante y herramientas de metal antiguos.

Algunos investigadores dicen que las rocas muy duras pueden cortarse con obsidiana, pero eso no concuerda con experimentos realizados de cortes finos de rocas y con lo que comentan los especialistas en abrasivos, que estos deben ser iguales o más duros que el material a cortar con ellos, si no se quieren hacerse en mucho tiempo.

Existen algunos escritos sobre huellas de uso de lítica pulida, pero son menos que los publicados de lítica tallada. Sergei Semenov⁷ es uno de los pioneros en la traceología funcional o de uso de objetos de la prehistoria, pero no se han traducido todas sus publicaciones y pocos autores han analizado formalmente en laboratorios piezas de obsidiana pulida con calidad de espejos y, menos, se han publicado abiertamente.

Sobre técnicas lapidarias prehispánicas, el primer texto local oficial conocido es el de Lorena Mirambell⁸. Para el bruñido final opina en general que era realizado con un material blando como una tela o piel, y arena fina o hueso molido en calidad de abrasivo, pero sin proporcionar detalles de los materiales y pruebas o bases de las opiniones. En otro texto de Castillo⁹ se incluye un apartado sobre técnicas lapidarias con opiniones generales similares, pero tampoco se proporcionan detalles y las pruebas realizadas o las bases de la sugerencia:

“para el pulido se puede emplear un pulidor de roca más suave, o alisadoras de madera de punta roma, pieles o telas”.

⁷ Semenov Sergei 1957. *Pervobitnaya Tekhnika*. Tecnología Prehistórica. Estudio de las herramientas y objetos a través de las huellas de uso. Tesis doctoral. Incluye magnificaciones < 100x. No se ha encontrado abierta.

⁸ Mirambell, Lorena. 1968 Técnicas lapidarias prehispánicas. Serie investigaciones XVI, INAH. México. 28,

⁹⁹ Castillo T, Noemí. 1976. Consideraciones Generales Sobre Conocimientos Tecnológicos Entre los Mayas Prehispánicos. Cuaderno de Arqueología 1. Sección de Arqueología del Museo Nacional de Antropología, INAH. SEP. 17

En los pocos escritos publicados sobre talleres lapidarios antiguos, las opiniones sobre el pulido también son muy generales, como uno de [producción de cuentas verdes de La Ventilla de Teotihuacán](#), de Gazzola, pero sin proporcionar detalles de los abrasivos y sus soportes utilizados, ni de los suelos del taller:

“El pulido se realizaba sobre una mesa de grano fino con el uso de abrasivos adecuados; la parte final del proceso era el bruñido, para lograr el brillo de una pieza frotada probablemente con piel y abrasivos muy finos.” (p 62)

Las técnicas de microscopía también pueden servir para analizar los granos abrasivos y sus huellas de corte, con magnificaciones micrométricas y manométricas. Por desgracia no se sabe con certeza el tipo de polvos que usaron en la antigüedad para pulir esos materiales con calidad de espejo, aunque han hecho algunas propuestas basadas en experimentos lapidarios.

Se han publicado abiertamente algunos estudios experimentales como la [Caracterización de huellas de manufactura en objetos lapidarios en objetos lapidarios de obsidiana del Templo Mayor de Tenochtitlan](#), de Melgar y Solís, así como [La pirita y su manufactura](#), de Melgar, Gallega y Solís.

Sobre los abrasivos y herramientas usados de los acabados de la obsidiana también comentan en general:

“Pulido con arena y piel, con polvo de obsidiana y piel de arenisca, bruñido con piel y la combinación de ambos.” (p 120)

Sobre su pulido y bruñido, también comentan algunos detalles:

“Las de basalto se caracterizan por presentar superficies lisas cruzadas por bandas redondeadas y difusas de aproximadamente 100 μm (fig. 6a). El basalto y arena tuvieron las mismas bandas muy difusas, pero el abrasivo añadía una textura irregular formada por líneas de tres μm de anchura y zonas alisadas (fig. 6b). La andesita presentó bandas rugosas de 66 μm (fig. 7a). La caliza dejó bandas de 20 μm de espesor y líneas muy finas de cuatro μm de anchura (fig. 7b). La arenisca produjo una superficie rugosa formada por sucesiones de bandas de diez μm de grosor y líneas finas (fig. 8a). Y la riolita dejaba rasgos muy difusos, a manera de bandas sinuosas de 33 μm (fig. 8b).” (p 122 y 123)

“3) Los pulidos con arena dejaron pequeños rayones que borraban el desgaste inicial y devolvían algo del lustre original a la obsidiana (fig.11a). Cuando se observaron con microscopía electrónica de barrido se notaron texturas irregulares sobre todos los desgastes, formadas por líneas entrecruzadas del orden de las tres μm de anchura (fig. 11b). Los pulidos con arenisca dejaron sucesiones de bandas rugosas de diez μm de espesor (fig. 12a). Asimismo, el polvo de obsidiana produjo una superficie sumamente lisa con finas líneas menores a una μm (fig. 12b).” (p 123)

“4) Por otra parte, los bruñidos alisaron las superficies de los desgaste previos, volviéndolos difusos (fig. 13a). O alisaron o cubrieron contextura los rasgos producidos por los pulidos al aplicarlos sobre éstos (fig. 13b).” (p 123)

Sobre las herramientas usadas para el acabado en el escrito de la pirita se mencionan los mismos que en el caso de la obsidiana, como el bruñido con piel (p 48).

Los pocos análisis de huellas de uso, manufactura o trabajo de lijado y pulido en objetos antiguos que se han publicado, son similares a los anteriores de obsidiana y pirita. En su mayoría, han mostrado vistas macroscópicas o microscópicas superficiales de dirección y ancho de bandas o separación entre las líneas de las rayas, su rugosidad y texturas con amplificación muy limitada, cuando mucho a 1000x.

Sin embargo, no se conocen caracterizaciones nanoscópicas con la morfología de las superficies pulidas, ni de los soportes usados para frotar los polvos, ni la granulometría de las arenas y los polvos finales utilizados para los lijados y el pulido o bruñido.

Los lijados son los que originan las rayas superficiales notables a amplificaciones de 1000x o menos. A esas amplificaciones pueden observarse las separaciones de las líneas del orden de las μm , como los producidos en el lijado o prepulido, pero la morfología de la rugosidad superficial lograda o las rayas nanoscópicas superficiales producidas con un pulido muy fino no pueden caracterizarse con claridad, si sólo se muestran fotomicrografías de su vista superior hasta 100x o 1000x.

Se han encontrado estudios abiertos de otras piezas hermosas de obsidiana con terminado que parece muy fino, como el [Análisis Tecnológico del Mono de Obsidiana de la Sala mexicana del MNA](#), también de Melgar, pero no se incluye la caracterización nanoscópica de sus superficies pulidas.

La granulometría de los polvos pulidores y los materiales usados para bruñir deben ser del orden de los nm, para poder dejar una superficie de poca rugosidad, como de espejo. Si a una amplificación de 1000x o menos, las rayas de los nm no pueden observarse, es otra prueba de que la superficie está bien pulida, pero para poder determinar una métrica de la rugosidad producida se requiere conocer la topografía de la superficie resultante vista de perfil, como se muestra en la Fig. 5.

Técnicas similares con análisis de perfiles de rugosidad microscópica, ya se han empezado a utilizar en algunos estudios de objetos arqueológicos de obsidiana, pero no son locales. Un análisis abierto muy singular encontrado sobre superficies pulidas de un singular brazalete de obsidiana se muestra en un estudio sobre [Multi-scale tribological analysis of the technique of manufacture of an obsidian bracelet from Asoki Höyük \(Aceramic Neolithic, Central Anatolia\)](#). Incluye el examen de la topografía superficial y de sus perfiles de rugosidad de $0.67 \mu\text{m}$ (p 3418).

En materiales no muy heterogéneos, es posible reconstruir la superficie nano-tridimensional con datos en dos dimensiones de imágenes en blanco y negro de microscopia electrónica, hasta magnificaciones de 150,000x, como se informa en

[Three-dimensional reconstruction of surface nanoarchitecture from two-dimensional datasets.](#)

Varios autores han publicado escritos con resultados de análisis de espejos antiguos, como los de la tesis de Tezcacuitlapilli de la pirámide del sol¹⁰ y [Los espejos de la reina de Copan](#), pero la mayoría se centra en el estudio del significado, morfología, iconografía o decorado con propuestas del posible uso, pero no en el examen de su función óptica sustantiva, ni del examen y caracterización de su superficie o los materiales y procesos técnicos usados para el procedimiento lapidario de su pulido. Cuando mucho, se han publicado fotomicrografías superficiales y análisis químico de sus materiales en laboratorio.

Algunos autores se han interesado más en plantear propuestas semiológicas, que en analizar y probar en laboratorio la supuesta función sustantiva de los espejos antiguos, como los de obsidiana.

Se han encontrado publicaciones sobre espejos antiguos como los incluidos en [The Olmec & Their Neighbors: Essays in Memory of Matthew W. Stirling](#)¹¹, by Michael D. Coe. En el artículo [Olmec Concave Iron-Ore Mirrors](#), John Carlson muestra las fotos de muchos espejos, incluyendo algunos del Museo Nacional de Antropología, pero tampoco incluye la caracterización de su superficie pulida. Comenta que hizo experimentos satisfactorios de pulido con *hematite jewelers rouge* (p 123), pero tampoco muestra las superficies logradas ni su métrica. Por ese tipo de faltante en las publicaciones arqueológicas localizadas, se desconoce el tipo de pulido y rugosidad de los espejos antiguos existentes.

Existen espejos de obsidiana en varios museos del extranjero como el [Obsidian mirror](#) del Museo Británico, pero aunque disponen de laboratorios con especialistas y equipos científicos avanzados no se han encontrado análisis microscópicos de la rugosidad de su superficie, ni estudios formales abiertos sobre su posible pulido original. En [Mexicolore](#), de Ian Mursell de Inglaterra, se muestra un escrito corto sobre [Smoking mirrors](#), que incluye una foto del hermoso espejo de obsidiana del Museo Británico y algunos de varios museos, incluyendo uno de pirita, pero no pudo encontrar estudios de la rugosidad de su superficie.

La composición de dos espejos de obsidiana de museos de Francia se comparan con las pinturas del pintor español Murillo sobre obsidiana con la técnica de microscopia [PIXE analysis of the obsidian support of two paintings from the Louvre by Murillo](#), pero tampoco muestran la rugosidad de sus superficies.

¹⁰ Tesis de arqueología de la ENAH-ININN de Tomás Villa Cordova, de 2009.

¹¹ Se incluye en [eBooks](#).

Por desgracia, sobre el pulido antiguo de los espejos de obsidiana existe poca información original o histórica, como la de Sahagún¹² que dijo que se usaba esmeril y un betún hecho de estiércol de murciélago y cañas de carrizo. Eso mismo se ha repetido en otros escritos¹³, pero no han sido publicadas pruebas de su efectividad.

Otra limitante, es que la mayoría de los espejos de obsidiana conocidos son descontextualizados, sin información detallada de su origen, temporalidad y proceso lapidario usado. De algunos dicen que no parecen antiguos.

Existen espejos antiguos que creen pudieron utilizarse para observaciones astronómicas, como uno convexo de piritita rescatado en [Toniná](#), pero no han podido conocerse ni sus fotos abiertas, menos, la caracterización de sus superficies pulidas.

Sobre trabajos históricos con espejos de obsidiana, se localizó un informe abierto de mediados del siglo pasado [Studies of Obsidian as a Material for Making Astronomical Mirrors](#), pero sobre su proceso lapidario sólo dicen que es similar al del *pyrex glass*, que es mejor conocido.

Se han publicado procedimientos recientes para pulir espejos de vidrio, hasta localmente. En el contenido de un curso sobre [Construcción de un espejo de telescopio](#) de SAFIR UNAM, de 15 cm de diámetro y 1.9 cm de espesor, se incluyen los polvos abrasivos o esmeriles que requieren en su proceso:

- 500 gramos de abrasivo n° 80 (Carborundum)
- 250 gramos de abrasivo n° 120
- 100 gramos de abrasivo n° 320
- 100 gramos de abrasivo n° 700
- 100 gramos de abrasivo n° 1000 (o esmeril fino)
- 250 gramos de pulidor para vidrio (Óxido de Cerio).

Dicen que el esmeril fino puede ser óxido de aluminio Alundum de 15 micras o Carborundum del número 303. El pulidor puede ser óxido de cerio (rosa claro), óxido de titanio (blanco) y óxido de hierro (rojizo) o Barnesita.

No es sencillo ni barato construir espejos grandes, como uno de 6.5 m de diámetro del proyecto de un nuevo [Telescopio óptico-infrarrojo de San Pedro mártir de Baja California](#), que estiman en un costo de 70 millones de dólares. En un [escrito del Instituto de Astronomía de la UNAM](#) dicen que ese telescopio va a costar 1000 millones de dólares. En el [Libro Blanco 2006-2012. Proyecto Gran Telescopio Milimétrico \(GTM\)](#)

¹² Sahagún, fray Bernardino de, 1956, Historia General de las cosas de Nueva España. Porrúa, México. 609.

¹³ Por ejemplo, en una [nota del Museo Británico](#) se comenta: “Sahagún specifically notes that a glue of bat excrement was also used, and the material was then polished with fine canes (which contain natural opaline silica).”

[del INAOE](#), se informa que desde 1994, se inició como un proyecto binacional con EUA.

El pulido del vidrio se incluye entre las [técnicas de fabricación de elementos ópticos](#), como las oftálmicas. Los espejos de gran tamaño requieren superficies finamente pulidas, ya que para obtener la resolución requerida, se pulen con una precisión mayor que $1/8$ de longitud de onda. En otras palabras, los errores de superficie o R_q en el espejo no pueden exceder de $0.05 \mu\text{m}$ o 50 nm . La dimensión de los granos para poder lograr un pulido con esa rugosidad debe ser cercana a 10 nm , ya que se estima que la dimensión de los fragmentos desprendidos de un grano abrasivo es de su diámetro aproximado entre 5.

La [rugosidad superficial](#) ya se ha estudiado formalmente hasta en el campo biomédico, como en el caso de terapias implantológicas y odontológicas, para disminuir los tiempos de curación y de superficie nominal de los implantes. También se ha empezado a publicar en escritos locales sobre [topometría](#).

Además de los telescopios, los lentes oftálmicos y las aplicaciones biomédicas, la óptica de precisión se requiere en varios campos como la de los microscopios ópticos y las cámaras fotográficas y proyectores, pero los de alta calidad y valor son importados.

El primer texto científico encontrado sobre el principio fundamental del pulido, que sigue siendo válido hasta en el nanopulido, con otros abrasivos finos, es de Isaac Newton:

“The smaller the particles of those substances (Abrasives: sand, putty or tripoly), the smaller will be the scratches by which they continually fret and wear away the glass until it be polished....”¹⁴

La “rugosidad de espejo” puede ser de un rango muy amplio. Las obleas de silicio para microcircuitos electrónicos tienen una rugosidad hasta $<1 \text{ nm}$. Han informado de espejos muy bien pulidos con muy baja rugosidad superficial, hasta 0.2 nm , como en uno de Zeiss [Ultra Violet Lithograph](#) (UVL) (p 13). Dicen que esa rugosidad corresponde a picos de 2 mm en áreas de Alemania, con montañas de 2962 m .

Eso significa que para lograr una rugosidad R_q de 0.2 nm , el diámetro máximo del abrasivo debe ser de alrededor de 1 nm . Esa rugosidad es cercana a la del diámetro atómico de los materiales pulidos. Por ejemplo, el de Si es de 186 pm o 0.186 nm . Por ello, es muy difícil lograr rugosidades iguales o menores a 0.1 nm o 1 \AA .

Es fundamental conocer y caracterizar los granos de polvos pulidores que se utilicen y de las superficies pulidas logradas, para tener una idea de la rugosidad mínima que pueden lograrse con ellos.

¹⁴ Sir Isaac Newton, [Opticks](#), Dover Publication Inc, NY, 1730. 386

Se estimaba que el mercado de nanopulido es y va a ser de gran valor económico. En 2004 estimaron el valor del mercado de esos agentes, sólo en semiconductores en 80 mil millones (*billions*) de Yens, con un crecimiento de 5% a 10% anual¹⁵. Los detalles de esas tecnologías son secretas, porque son patentables. Por ello, son poco conocidas abiertamente con detalle y, menos, localmente.

En varios museos, también existen piezas lapidarias con superficies que parecen finamente terminadas, de jadeita, turquesa, cuarzo, ilmenita, pizarra y otros tipos de rocas o minerales, pero tampoco se sabe bien como se pulieron sus superficies. Menos se sabe cómo fueron devastadas y lijadas las superficies antes de ser terminadas, principalmente porque usualmente sus rastros o huellas se eliminan con el pulido final. Es difícil encontrar piezas arqueológicas de obsidiana pulida sin alterar, porque en la mayoría, sus superficies se modifican en el tiempo por los efectos de la humedad, temperatura y materiales adjuntos.

También es difícil recuperar polvos pulidores en exploraciones arqueológicas, porque usualmente las tierras de suelos de talleres lapidarios antiguos se ciernen con mallas de mm o μm . La mayoría de lo cernido que recuperan puede analizarse y observarse a simple vista (si son >0.1 mm) o, cuando mucho, con una lupa. Se han encontrado micrografías de especies biológicas fosilizadas como polen, diatomeas y algunas otras, pero la mayoría de las más pequeñas publicadas tienen dimensiones de μm .

Ahora, para desbastar lapidariamente la mayoría de las piezas en talleres nacionales se utilizan discos de esmeril y lijas de carburo de silicio o carborundo (SiC), principalmente por su: gran dureza (9.5 Mohs); bajo precio; disponibilidad comercial y; morfología con esquinas afiladas. Usualmente, usan dos esmeriles, uno áspero y otro fino. Las lijas rotadas mecánicamente pueden ser, al menos, de tres grados: grueso (80 o 120); medio (180) y; fino (220 o 280). El lijado se hace mecánicamente en seco. Para sostener las piezas pequeñas, se pegan en un palito con lacre, calentados con un mechero Bunsen, que es necesario si se quieren dejar las manos libres, o un encendedor. Las [teselas pequeñas de turquesa](#) fueron pegadas a un palito con lacre.

Han informado que en Tequila y en otros talleres actuales, como algunos de Teotihuacán y en Nopalillo, aun hoy usan el polvo desprendido de los procesos lapidarios de la misma obsidiana para pulirla¹⁶, pero humedecido sobre superficies de soportes rotatorios de cuero o baqueta, tela dura como mezclilla o fieltro, aunque no todas las piezas ofrecidas en el comercio local tienen superficies con calidad de espejos. Puede analizarse y probarse ese tipo de polvo fino, si se consigue. Para pulir

¹⁵ [Misubishi](#) dice que ha desarrollado abrasivos de 1 nm, con moléculas de *fullerene* hidratado

¹⁶ Alberto Pelcastre Ramírez, del Taller de Artesanías “La Huerta” de Nopalillo de la Sierra de las Navajas, informó que el polvo fino de la obsidiana se obtiene decantando las partículas más gruesas del agua agregando diésel.

la obsidiana, en algunos talleres, como [uno de la zona de la Sierra de las Navajas](#), usan oxido de cerio, que también se aprovecha para pulir vidrios.

Como no se han encontrado protocolos formales locales abiertos para la preparación de superficies de obsidiana con calidad muy fina de espejo, a pesar de haber consultado a los mejores especialistas de laboratorios y campos relacionados conocidos y habiendo analizado sus escritos abiertos, se hicieron algunos análisis y experimentos con materiales locales que se encontraron disponibles.

En el primer ejercicio, se analizaron y limpiaron las lijas de SiC, para evitar las rayas profundas iniciales, ya que son difíciles de eliminar en las etapas posteriores y finales de lijado y pulido. Pudo verse que las lijas no tienen granos pegados homogéneos, ya que normalmente su grado asignado es un promedio de una gama de dimensiones. Los granos más grandes son los que generan las ralladuras más profundas del lijado.

Por ejemplo, la fotomicrografía de la Fig. 8, muestra la superficie de una lija nueva de grado 400, tomada con el mismo microscopio óptico. Las divisiones de la derecha son en milímetros. Se observa que la superficie no es homogénea, ni sus granos. Por ello, primero fue necesario asentar su superficie, frotando sobre ella una pieza dura plana, antes de su uso definitivo. En este caso, por tener 6 superficies planas, se utilizaron unos singulares silbatos bucales, incluyendo uno de obsidiana dorada y otro de obsidiana azul verde de Magdalena (Fig. 9) que no es muy conocida, ni por los especialistas. Esos singulares silbatos mexicanos, tampoco son muy conocidos.

En la Fig. 10 se muestra muy bien el brillo especial de las partículas y burbujas internas del silbato de obsidiana dorada, tomada con el microscopio óptico e iluminada con luz fuerte de sol. A esa amplificación, no se muestran rayas en la superficie pulida. Como existen muchos tipos de obsidianas, cada una debe tener características lapidarias diferentes y su proceso de pulido puede variar, así como sus superficies finales.

La Fig. 11 muestra parte de la superficie pulida del silbato bucal de obsidiana dorada con una cana, tomada con la misma *webcam*, pero adaptada al microscopio e iluminada con un foco azul de luz blanca de 100 Watts (Osram). La imagen muestra las burbujas internas típicas de ese vidrio volcánico especial, que es un poco transparente, aunque a esa mayor amplificación tampoco aparecen ralladuras superficiales.

También, es necesario mantener una buena limpieza en el proceso, ya que hasta un sólo grano de dimensión mayor en la superficie de una lija o localizada entre ella y la pieza puede rallarla. En la fotomicrografía de la Fig. 11, se muestra la superficie de una lija usada de grado 400, tomada con el mismo microscopio óptico. Se observan granos sueltos y huecos en su superficie.

Se ha sugerido que las lijas, los granos y los polvos pulidores a usar deberían caracterizarse. Hasta con una *webcam* Akteck barata, montada sobre un soporte variable verticalmente, pueden analizarse sus superficies. Por ejemplo, en las Figs. 12 y 13 se muestran fotomicrografías de lijas grado 120 y 2000 con el papel cuadriculado en mm. Las imágenes no son de mucha nitidez, aunque ya dan una idea de su granulometría, que podría mejorarse con un buen microscopio óptico o un MEB.

Existen otros equipos avanzados de laboratorio como el *Laser Scanning Confocal Microscope*, (LSCM) que se ha utilizado para analizar la [topografía tridimensional y perfiles huellas de uso o manufactura en obsidiana](#) y de otros materiales como en [raspadores de cuarcita](#), pero tampoco se encontraron trabajos similares realizados con materiales locales.

Cuando los materiales abrasivos y pulidores no se han caracterizado con microscopía, como los disponibles comercialmente en nuestro país, es necesario analizarlos y probarlos antes de usarlos en definitiva en procesos lapidarios controlados.

Anteriormente, varios abrasivos en grano fino pudieron analizarse con microscopio¹⁷, como uno de [SiC](#) (estos granos tienen esquinas afiladas y son duros, por lo que son muy efectivos en el corte de rocas y aceros duros) y otro de [cuarzo](#) (que son de varios tamaños y no están muy redondeados, ni tienen esquinas afiladas). Ambos abrasivos en grano se utilizaron en experimentos manuales de corte y lijado de teselas de turquesa, que se muestra hasta en un [video corto](#).

Pueden verse las [huellas dejadas en una tesela de turquesa por el lijado circular con granos de cuarzo](#). Otra [tesela de turquesa](#) muy pequeña (1.5 mm de ancho) fue frotada sobre lija fina de papel para madera, de óxido de aluminio (corindón), para mostrar el tipo de canales resultantes, que también muestran las direcciones en que fue frotada la pieza lijada.

En un segundo ejercicio, ya pudo aplicarse un procedimiento experimental de lijado manual mejor controlado. Se lavaron las lijas de SiC y las manos con agua y jabón, antes de cada lija húmeda que fue colocada sobre un vidrio grueso en seis grados: 400, 600, 800, 1000, 1500 y 2000. La pieza fue cortada inicialmente con un disco de diamante fino (grado 400) fue frotada con cada lija durante pocos minutos. Los lijados de cada grado fueron alternados, en un sentido y a 90 grados, para poder observar con el microscopio óptico cuando se eliminaban las rayas perpendiculares más profundas anteriores, para pasar al siguiente lijado más fino y evitar el riesgo de tener que repetir lijados gruesos previos. Pueden utilizarse discos con granos de diamante, pero son caros y no se disponen en todos los grados usados en lijas de SiC.

¹⁷ Con un microscopio óptico del Laboratorio de Petrografía de la Escuela de Ciencias de la Tierra del IPN.

Como pulidores, se probaron dos polvos efectivos, que inicialmente fueron aplicados manualmente sobre cuero pegado en dos discos de 8" de diámetro: uno de acrílico y otro de hule. Ambos se pegaron a un disco de hierro, para poder fijarlo por magnetismo al plato rotador mecánicamente que fue usado posteriormente. Una parte del polvo se diluyó en dos partes de agua. La mezcla líquida fue aplicada a la superficie del cuero un poco humedecido. Un primer polvo es el llamado LINDE (alúmina u óxido de aluminio Al_2O_3)¹⁸ y otro posterior fue el CERIUL (óxido de cerio Ce_2O_3)¹⁹, que se utiliza para pulir vidrios con calidad de espejos. El óxido de aluminio es duro (9 Mohs), pero del usado no se ha encontrado la caracterización con microscopía electrónica. Por ser duro, pudo usarse para un primer pulido manual que duró más de una hora.

Del Ce_2O_3 usado, tampoco se conoce localmente su caracterización lapidaria, pero lo interesante es que dicen que es mucho más blando (2.5 Mohs) que el vidrio común (5 - 6 Mohs) y la obsidiana (5 – 5.5 Mohs). Hasta han propuesto que los pulidores deben ser de menor dureza que el material a pulir²⁰. Eso indica que los pulidores no cortan sólo mecánicamente como los abrasivos. Parece que influye hasta la alcalinidad del líquido usado como lubricante y ocurren efectos químicos en el proceso, además de los derivados de la morfología, granulometría, dureza y tenacidad de los polvos de óxidos pulidores. Algunos opinan que durante el proceso de pulido pueden ocurrir fusiones del material frotador con el frotado, que disminuye su rugosidad. Eso puede ocurrir, porque los pulidos muy finos se trabajan cerca del límite de las estructuras de los cristales más pequeños y la de los átomos.

El pulido mecánico también se probó usando un disco de cuero y otro de fieltro, también de 8" de diámetro, rotado a baja velocidad (150 rpm), similar que con el disco de cuero de res durante 10 minutos, con buenos resultados.

Utilizando el procedimiento descrito pudo pulirse una muestra de obsidiana de 1 cm x 1 cm, para análisis del SIMS. También se logró una superficie bien pulida con rugosidad aceptable. Otra pieza de obsidiana de dimensión un poco mayor (2 cm x 1.8 cm) pudo pulirse por 3 horas, con alta calidad de espejo, como se muestra en la foto del reflejo de los dedos en la Fig. 15, lo que prueba la efectividad del procedimiento manual, aunque falta analizar su rugosidad a nivel manométrico.

Los ejercicios realizados muestran que el proceso lapidario de lijado y pulido puede primero vigilarse y controlarse a nivel macro hasta con una lupa de joyero y registrarse con una *webcam*, aunque con un mejor microscopio puede lograrse mayor amplificación y definición hasta de los polvos usados, como ya se hizo desde 300x

¹⁸ Me informaron que fue traído de EUA. Puede probarse otro disponible en el mercado local.

¹⁹ El usado en las pruebas VINCI fue adquirido en la [Casa Galván](#), sin información de sus características.

²⁰ [Properties of polishing media for precision optics. Kaller A. 1998.](#)

hasta 160,000x con un [pigmento rojo industrial](#) (hematita o Fe_2O_3) usando un MEB del [Centro de Nanociencias y Mico y Nanotecnologías](#) de IPN.

Ese pigmento rojo analizado es interesante y singular, porque también se aprovecha mucho como polvo pulidor, igual que otros óxidos, como los de titanio, zinc, cromo y estaño (*tin*). A pesar de su importancia en procesos industriales, no existen [Patrones nacionales](#) oficiales de esos pigmentos y pulidores, y sus proveedores locales tampoco proporcionan información técnica detallada de ellos.

Tampoco se han encontrado publicaciones sobre caracterización con microscopía electrónica de polvos finos de pigmentos cerámicos antiguos mexicanos.

En el extranjero existen especificaciones técnicas de granos abrasivos, como los de la [FEPA Grains Standards](#) y [FEPA tandards relevant for abrasives](#), pero no están abiertas y no se sabe si pueden relacionarse con los comerciales que ofrecen localmente.

En un trabajo futuro, también sería interesante registrar con un buen microscopio, las superficies de los esmeriles o del corte de la pieza con disco de granos de diamante, de las lijas y de las rayas o huellas de corte de cada una de las etapas del proceso descrito de lijado y pulido de una muestra de obsidiana, incluyendo la rugosidad del perfil final superficial con dimensiones de nanómetros.

Existen equipos y patrones para analizar y comparar la rugosidad de superficies lijadas y pulidas, pero se refieren a los maquinados industriales más comunes, como los de metales a nivel de μm .

Las rayas resultantes del lijado y las partículas depositadas sobre la superficie pueden verse hasta con una lupa de joyero. También es posible usar una *webcam*, pero es mejor usar el microscopio óptico con buena iluminación cercana, para poder mostrar un ejemplo de lijado con carburo de silicio grado 280 (Fig. 16). Las rayas resultantes son del largo de toda la pieza, pero no son del mismo ancho y profundidad, aunque todas muestran la dirección similar del raspado.

Tampoco es igual la distancia entre las líneas del lijado, lo que no concuerda con lo que han comentado algunos investigadores que analizan huellas de manufactura o trabajo lapidario; que los abrasivos de un material dado producen líneas separadas a una distancia o banda constante. Se ha visto que la profundidad y ancho de las rayas producidas varían de acuerdo a la dimensión de los granos abrasivos usados, aun cuando sean de un mismo material, como el carburo de silicio usado.

En la Fig. 17 se muestra la superficie de la lija usada, que fue iluminada con luz lateral de sol de la tarde, se observa bien la causa de las rayas producidas, ya que los granos grises y negros cortadores no son homogéneos en dimensión y los huecos y valles que

fueron llenados con los polvos casi blancos de la obsidiana lijada, que llaman “embasamiento”. Se muestran algunos granos de mayor dimensión, que son los que producen las rayas más notables.

Como se ha comentado, un sólo grano mayor, como el mostrado dentro del círculo rojo de la Fig. 17, genera las rayas más profundas. Si subsisten granos de mayor dimensión del abrasivo, significa que no se desgastaron mucho con el lijado de la obsidiana. Inicialmente, el aplanado de la lija se origina más por el material cortado de la obsidiana que se deposita en los espacios entre los granos del carburo de silicio. El resultado de ello es que la superficie de la lija usada tiene menor rugosidad aparente, que puede ser temporal, si se lava y limpia con agua el polvo de la obsidiana lijada, pero eso no elimina los granos mayores adheridos.

El trabajo propuesto de registro es relevante, porque además de servir para caracterizar y documentar bien los resultados del proceso, puede aprovecharse para pulir en forma similar superficies con calidad de espejo de piezas de otros materiales sólidos, como rocas y metales.

El proceso descrito también puede ser aplicado con granos abrasivos y polvos pulidores. Sin embargo, existen [tres técnicas fundamentales de abrasión](#): a) Deslizamiento en dos direcciones (movimiento recíprocante) de tres superficies en contacto, una es ellas es del abrasivo en grano, otra es la roca a cortar y la tercera es la herramienta que arrastra el abrasivo (como los polvos pulidores usados); b) Movimiento recíprocante del grano de abrasivo aglutinado en la herramienta (como los esmeriles y las lijas usadas) y la pieza a cortar, y; c) Deslizamiento recíprocante entre las superficies interactuantes de dos piezas, una es la que se corta y otra es la raspadora (sólida).

El primer proceso (a) es el que más pudo practicarse manualmente en el pasado, utilizando arenas abrasivas en varios grados y polvos pulidores. Para probarlo, sólo se requiere hacer experimentos con los materiales naturales²¹, aunque son muchos y de características diversas y no es sencillo obtenerlos en grados homogéneos. El último proceso (c) comentado puede utilizarse para bruñir superficies, como en el caso de la cerámica cruda húmeda, que se abrillanta con una roca dura pulida. Algunos dicen que la obsidiana puede bruñirse con cuero²² y madera, o hasta carrizo y diatomeas, aunque habría que probarlos experimentalmente. También podrían analizarse y probarse otros

²¹ Los materiales son casi infinitos, ya que existen en la tierra como los sedimentos, en la flora como las fibras y en la fauna como los cueros. Por ejemplo, sólo la dimensional de la granulometría de las rocas y los sedimentos cubre un rango de más de 10^{10} (de los m a los nm) y pueden tener todos los elementos químicos de la tabla periódica.

²² El cuero aún se usa para asentar filos de aceros duros como navajas de barbero.

procesos utilizados en talleres lapidarios de obsidiana, como el siguiente ya realizado parcialmente.

Experimento de lijado de obsidiana verde de Magdalena, Jalisco. Se usó el método que practican en sus talleres mecanizados y en otros como de Tequila, pero para controlarlo bien, fue manual, y pegando la pieza con lacre en un soporte de madera. Parece que esa obsidiana verde es menos dura que la negra. Las lijas un poco usadas previamente fueron de SiC de 3 grados grueso (80), medio (120) y fino (280). El procedimiento fue colocando las lijas secas sobre un vidrio, primero frotando la pieza en una dirección y luego a 90 grados para poder ver la eliminación de las rayas anteriores, lavando la pieza y las manos entre cada pulido y; el control y registros e hizo visualmente con una lupa y el microscopio bifocal Nikon SMZ-1. Lo importante es no dejar rayas profundas, porque en los lijados finos y el pulido es difícil eliminarlas.

En el experimento de la obsidiana verde, no se siguió el proceso manual de lijado más fino y pulido, porque ya se hicieron experimentos manuales con lijas de SiC con grados finos, más los polvos pulidores de óxidos de aluminio y cerio. Las lijas usadas se guardaron en bolsas de plástico para poder analizar mejor su superficie con posterioridad, ya que son igual de importantes que las de la pieza lijada, para poder analizar y caracterizar bien el proceso realizado de lijado.

Principales observaciones del proceso experimental: Las lijas secas tienen mayor poder de corte, que cuando son usadas con agua o después de usarlas mucho mecánicamente; La primera pulida requirió menos de 5 minutos, para el desbaste y la eliminación de las huellas iniciales de los discos abrasivos de carburo de silicio (grueso y fino); La segunda pulida fue de más de 10 minutos para poder eliminar las rayas profundas del primer lijado; la tercera pulida requirió de más de 20 minutos, para eliminar las rayas del segundo lijado; Con cada lijada las rayas resultantes fueron menos anchas y profundas; En todas las lijas usadas se depositó el polvo desprendido por la abrasión de la obsidiana (como ya se mostró en la Fig. 17) y por ello los granos de la lija fueron perdiendo un poco su rugosidad y poder de abrasión; Con la tercera lijada, la superficie resultante es casi de prepulido, posiblemente por el efecto de “embasamiento” de los granos de la obsidiana depositados en la lija, y; A simple vista, la superficie de la pieza se ve un poco brillante, pero con una lupa y el lente del microscopio de 20x, aún pueden observarse bien rayas producidas por la lija fina.

El proceso lapidario manual de lijado y pulido manual repetitivo y sus sonidos, generan efectos especiales, como el de percibir un menor tiempo en sus procesos que el de la duración real, como ya se ha informado en los estudios anteriores, como el de los [Ritmos sonoros paleolíticos](#) y el último del [Ritmo huichol \(wirikuta\)](#). El timbre de los sonidos del raspado varía, al usar las lijas gruesas, medias y finas.

En el proceso mecanizado más rápido, con raspados en varias direcciones y con lijas más usadas, las rayas resultantes son de menor profundidad, como se ha visto que ocurre en varios talleres lapidarios, incluyendo uno del centro de la Ciudad de México y en las pruebas del autor.

En los últimos ejercicios controlados teselas pequeñas de obsidiana, que fueron cortadas con un disco delgado de grano 400 de diamante²³ y pegadas con lacre sobre un soporte de madera, se probó que puede disminuirse el tiempo y los pasos de lijado manual en seco; alternado en 90 grados y vigilado la eliminación de las rallas más gruesas del lijado previo con el microscopio óptico, con lijas sobre un vidrio de SiC (*BUEHLER*) con los granos 400 (1 minuto), 600 (30 s) y 2000 (30 s). El pulido mecánico fue con cuero y alúmina con agua filtrada (30 minutos)²⁴, para lograr un buen pulido y más fino en 60 minutos.

Durante el trabajo de lijado en seco, deben utilizarse cubrebocas o filtros finos, porque el polvo de los abrasivos y pulidores puede ser peligroso para la salud. [La exposición excesiva del polvo de SiC puede causar *pneumonocomiosis*](#) (enfermedad pulmonar crónica) y [el polvo de Si₂O₃ puede producir *silicosis*](#): unas cicatrices en los alvéolos que impiden que el oxígeno llegue a la sangre.

Las características de los abrasivos de las lijas y sus efectos no son iguales. Por ejemplo, La dureza del SiC es alta (9.4 Mohs), su tenacidad es baja (55) y sus aristas y fracturas son muy vivas, por lo que las rayas que produce son profundas. Es para aplicaciones en materiales duros. El Al₂O₃ es igual de duro (9.4 Mohs), su tenacidad es mayor (75), pero sus aristas y fracturas son romas que producen rayas anchas y profundas, para aplicaciones en materiales blandos, como la madera.

Hay que evitar en el proceso que se desprendan fragmentos o esquirlas de la obsidiana que puedan rallarla, como los que ocurren en su macrotallado, si accidentalmente se golpean sus esquinas con la superficie del cuero o si se agregan partículas de los lijados anteriores por contaminación o falta de limpieza entre los lijados.

Otra ventaja del pulido en seco, es evitar la posibilidad de introducir arenas del agua corriente. Para evitar eso, es posible utilizar agua destilada o, al menos, filtrada.

La dinámica que ocurre superficialmente a nivel nanoscópico en el pulido es un misterio por explorar en nuestro medio, pero se cree que puede incluir efectos similares al lijado y el macrotallado, en el que se deprenden partes de una roca o mineral, con golpes y/o presión de otro material sólido similar, que puede ser hasta de menor dureza. Una diferencia es que en el pulido puede utilizarse un líquido lubricante para eliminar las

²³ Cortados *BUEHLER Iso Met 1000 precisison saw* a 100 RPM.

²⁴ Equipo *BUEHLER Meta Serv 250 Grinder-polisher* a 200 RPM.

partículas desprendidas, y como refrigerante para evitar el aumento de la temperatura por la fricción, sobre todo, si se hace mecánicamente.

El líquido lubricante no necesariamente es el agua. Por ejemplo, en un video [Microscopy Sample Preparation. Part IV, Polishing](#) del Museo Smithsonian comentan que para pulir superficies de 4 muestras para microscopia utilizan: 6 gotas de gasolina blanca (*stoddard solvent*): lijas de óxido de aluminio (15 micrones, por cerca de 2 minutos, luego 5 y 1 micrones y 0.5 y 0.3 micrones, si se requiere pulido más fino), y: que son adheridas sobre un vidrio con un poco de agua de un rociador. Comentan que el proceso puede vigilarse con un microscopio. Ese proceso podría probarse con obsidiana, si se consiguen las lijas de Al_2O_3 .

En un documento abierto encontrado sobre la preparación de muestras ([Sample preparation and mapping](#)) proponen para el pulido: Lijar la muestra sobre una superficie plana, utilizando lijas de 100, 260, 600 o ruedas de diamante de grano de malla, o equivalentes. En [otro procedimiento](#) proponen utilizar agua ionizada.

Es necesario analizar con microscopios de mayor amplificación las superficies de los materiales usados para el pulido o bruñido, aunque ya se han examinado con el microscopio bifocal. En la Fig. 18 se muestra la superficie del cuero usado con polvo de óxido de aluminio.

La caracterización de los nanomateriales comerciales procesados es uno de los temas relevantes de actualidad entre las investigaciones más avanzadas en nanotecnología aplicada. Por ejemplo, en el área de [Meaningful nanotechnology EHS \(environmental health and safety\) research requires independent nanomaterial characterization](#) han comentado:

"What we found in our work is that nanomaterials purchased from commercial sources may not be as well characterized as indicated by the manufacturer.....For example, it might be stated that a certain nanoparticle is being sold as 30 nm in diameter and, although '30 nm' might be close to the average diameter, there is usually a range of particle sizes that can extend from as much as small as 5 nm to as large as 300 nm."

Como ejemplo, muestran una imagen (A) de *Transmission electron microscopy (TEM)* de nanopartículas esféricas de Al_2O_3 y otra (B) de la distribución de frecuencias (*Count*) de su tamaño, desde 10 nm hasta 150 nm.

La caracterización de nanopartículas también es un tema de estudio necesario en la mayoría de los sistemas de producción y procesos tecnológicos de materiales²⁵, aunque no es sencillo ni muy practicado localmente y publicado abiertamente, a nivel nanoscópico. En aplicaciones de ingeniería, como en la de suelos y [materiales de](#)

²⁵ Hace mucho tiempo el distinguido Ingeniero Javier Barrientos Esparza (finado), me dijo que es necesario conocer bien los materiales que utilizamos, pero hasta ahora empiezo a entender bien y apreciar el significado de ello.

[construccion](#), se utiliza el tamizado, pero la malla más fina que normalmente usan es con criba de grado 200, que tiene una abertura de 0.074 mm.

Existen otros métodos y equipos especializados como el Granulómetro laser, para el [análisis de tamaño de partículas](#). Se encontraron algunos estudios abiertos que utilizan equipos especializados para caracterizar partículas, como el de [NIST Particle size characterization](#) de *Internet Archive* y en [Tip Dilation and AFM Capabilities in the Characterization of Nanoparticles](#) y [Part I: Introduction to Nanoparticle Characterization with AFM](#).

Ya han analizado los granos abrasivos y hasta los restos remanentes del pulido, como el [óxido de cerio usado para pulir vidrio](#), con micrografía amplificadas a 20,000 x y 50,000 x. Las muestras fueron pegadas en cinta de carbón y recubiertas con oro a 10 mA por 150 s. También se han analizado las [variaciones de las partículas de óxido de cerio](#). Los polvos blancos son los más finos.

Se han encontrado publicaciones del extranjero con resultados de estudios sobre los procesos de lijado y pulido de superficies en varios materiales, pero por su valor comercial e industrial, muchos no son abiertos o fueron patentados.

Uno de los métodos más avanzados para pulir superficies es el llamado [Chemical Mechanical Polishing/Planarization](#) (CPM) que se utiliza en la industria automatizada de los semiconductores de silicón²⁶, pero los sistemas son caros para ser usados en países subdesarrollados. Aunque se disponga de recursos para adquirir equipos avanzados para la planarización y terminado manométrico de materiales, es necesario caracterizar los abrasivos a utilizar en procesos controlados. El [mercado mundial de equipos y materiales del CPM](#) es de varios miles de millones de dólares anuales.

Algunos administradores e investigadores locales cuestionan el análisis formal de los abrasivos, pero parece que no reconocen su importancia actual. Los abrasivos no sólo sirven para trabajar artesanías y ornamentos o para usarse en la preparación de muestras para análisis o proceso en laboratorios científicos. Ninguna maquinaria industrial, de transporte o de cualquier otro tipo y uso puede funcionar bien sin abrasivos y pulidores de buena calidad para poder maquinar y terminar superficies de los rodamientos y otros mecanismos con caras finamente pulidas. Ahora, ningún país desarrollado técnicamente puede moverse sin ellos. Desde que se inventaron los transistores, la microelectrónica no puede existir sin abrasivos.

²⁶ Shin Hua y Robert Miller. *Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing*. 1999

Los datos estadísticos indican que la rama productiva de los abrasivos es de cierta importancia económica. En 2012, la [demanda mundial de abrasivos](#) se estimó en cerca de \$ 40 mil millones de dólares, con un crecimiento anual de 6 % hasta 2017.

En 2011, el valor de la [Fabricación de productos abrasivos en México INEGI](#) (Código 327910, Cuadro 1.1, p 61), fue de 1,824,293 miles de millones de pesos y de los insumos 1,459,381. En el periodo de 2011-2012, la exportación de los Abrasivos Naturales fueron de 114,525,323 kilogramos y \$119,556,777 dólares corrientes, según el [Anuario Estadístico de la Minería Mexicana](#) de 2013 (p 736). Como ya se dijo, toda la industria y otros sectores que los usan no pueden funcionar sin ellos y sus productos, aunque muchos se tengan que importar, como los de mayor valor agregado, incluyendo los electrónicos.

La minería de mayor valor ha sido concesionada, principalmente a extranjeros, y muchos productos elaborados con minerales se importan, como algunos abrasivos, pulidores y pigmentos. Otros se llevan las rocas y nos las regresan engarzadas en joyas. Es similar a lo que ocurre con el petróleo y otros productos de mayor valor.

Solo en los últimos 14 años de administraciones entreguistas dicen que se han saqueado 618 toneladas de oro²⁷, principalmente por empresas canadienses y unos lores locales. Al precio de compra actual, es más de \$ 5.4 x 10¹² pesos y no se conoce el beneficio nacional de eso y de la devastación por las minas abiertas y la contaminación de la tierra y los ríos.

Para dar una idea detallada de la situación de dependencia en la rama productiva lapidaria, es ilustrativo comentar que no se ha encontrado una sola tienda local que venda productos y equipos lapidarios nacionales o del extranjero, a pesar de la gran riqueza y diversidad mineralógica del país y las necesidades para las manufacturas de materiales.

Hace tiempo, el polvo pulidor LINDE (alúmina) y el lacre que he estado usando fueron traídos de los EUA. Aquí, ya no se han encontrado en las tiendas para joyeros. Se vende óxido de aluminio para pulir metales, dientes y como [material cerámico](#), pero para esto último no se requiere de una granulometría homogénea. En algunas papelerías se ofrece [lacre para sellar sobres](#) y su preparación se describe en libros viejos de [artes y oficios](#) (p 515). Los polvos de tierras como la hematita, también se han usado en el lacre.

Tampoco se han encontrado manuales²⁸ y escuelas locales sobre lo lapidario, ni cursos formales sobre [lapidación](#), o industrias que produzcan equipo lapidario especializado

²⁷ México SA. La Jornada (p 20).

²⁸ Como los existentes en el extranjero: Sinkankas, John. 1962. [Gem Cutting. A Lapidary's Manual.](#)

nacional, aunque su ingeniería no es muy difícil para poder diseñarlos y construirlos. Los principales equipos de los laboratorios científicos locales y muchos de sus materiales, también son importados.

Hace años, la lapidaria era el segundo pasatiempo (*hobby*) en los EUA, después de la fotografía. En el México antiguo, la lapidaria era muy practicada, apreciada y aprovechada por todos los poderes. Ahora, la obsidiana se pule principalmente en los talleres mencionados de Magdalena, Tequila, Teotihuacán, la zona de Las Navajas y, con mayor amplitud, la lapidaria se practica en los de Taxco y Querétaro.

Es sorprendente y admirable que los maestros lapidarios antiguos hayan podido encontrar, preparar y utilizar granos abrasivos y polvos pulidores finos naturales efectivos en varias granulometrías homogéneas necesarias, sin disponer de los sistemas y equipos científicos o tecnológicos actuales, aunque se desconoce la caracterización del pulido que pudieron lograr.

Es posible moler rocas y arenas con piedras duras, aunque no es sencillo. Los sedimentos naturales son abundantes, pero hay que separarlos. Se ha visto y probado que es posible separar partículas cerámicas muy finas por sedimentación en agua.

También es necesario estudiar los abrasivos naturales existentes en el país, pero los que estudian las ciencias de la tierra y los materiales no renovables, ni siquiera publican su localización geográfica.

Existen redes locales de investigadores, centros y cursos de posgrado sobre nanotecnologías y nanomateriales, pero no se han encontrado proyectos sobre caracterización y prueba de polvos pulidores muy finos de dimensiones manométricas, como los <100 nm.

Lo más importante que falta por realizar es caracterizar los granos de los polvos pulidores disponibles y otros materiales industriales, de talleres o naturales que puedan conseguirse localmente, así como probar un proceso completo mecanizado, para disminuir el tiempo de trabajo o aumentar el tamaño de las piezas pulidas con calidad de espejo, para formular un protocolo del proceso efectivo resultante.

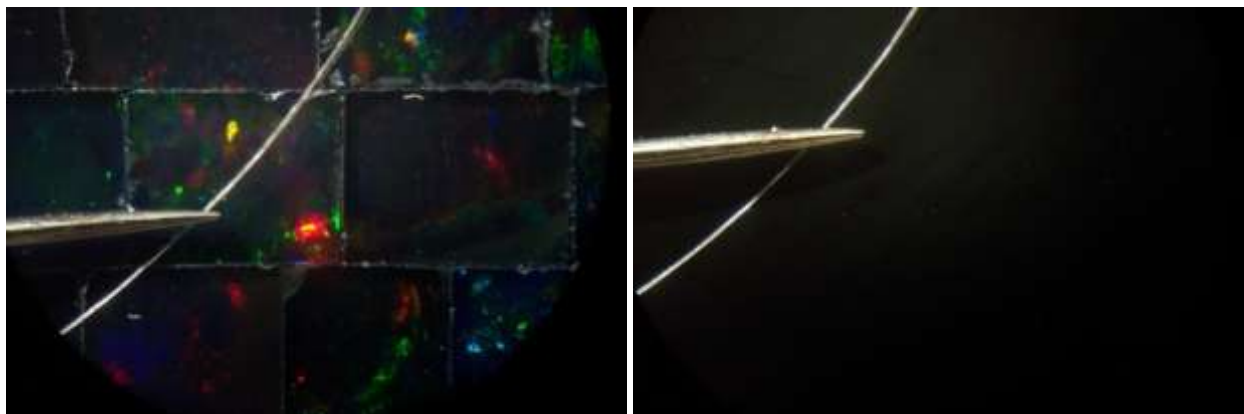
En el caso de las piezas bien pulidas antiguas rescatadas, es conveniente caracterizar la rugosidad de su superficie, con las técnicas y equipos comentados, para caracterizar y conocer el tipo de superficies logradas en el pasado y poder replicarlas, para explorar experimentalmente y mejorar las posibles técnicas lapidarias usadas en el pasado.

El suscrito ya no ha podido mejorar los trabajos realizados, porque no se han encontrado interesados institucionales en apoyar estudios independientes sobre las tecnologías mexicanas, antiguas o futuras.

Se informó del escrito a los principales especialistas relacionados con el tema, pero no se han recibido comentarios o sugerencias para mejorar los ejercicios realizados.

Ya se ha comentado que ni siquiera se han encontrado documentos oficiales rectores para investigar y desarrollar las tecnologías mexicanas, aunque desde 2001, se han hecho [peticiones ciudadanas](#) para ello.

Figuras



Figs. 2 y 3. Fotomicrografía de las teselas de ópalos y de la base de obsidiana.



Fig. 4. Fotomicrografía lateral de la pieza.



Fig. 5 Perfil del segmento R-M de la superficie de obsidiana. Por Georgina Ramírez.

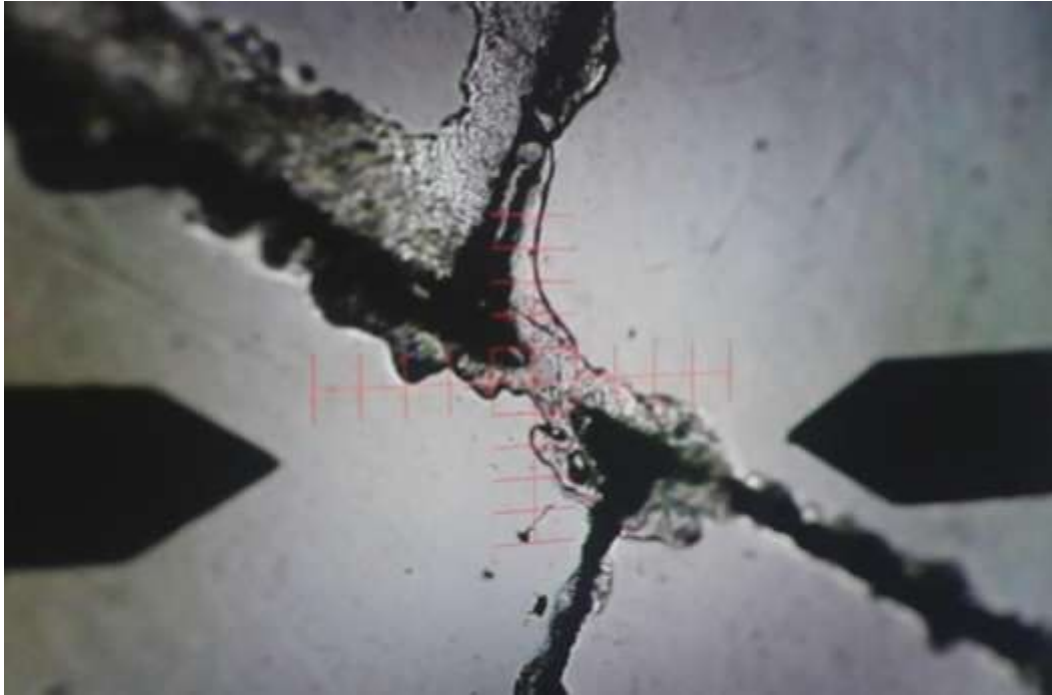


Fig. 6. Fotomicrografía de una unión de teselas de ópalos. Por Georgina Ramírez



Fig. 7. Dedos reflejados en la superficie posterior de la base de obsidiana negra.



Fig. 8. Lija nueva de carburo de silicio grado 400.



Fig. 9. Silbatos bucales de obsidiana dorada y azul verde.

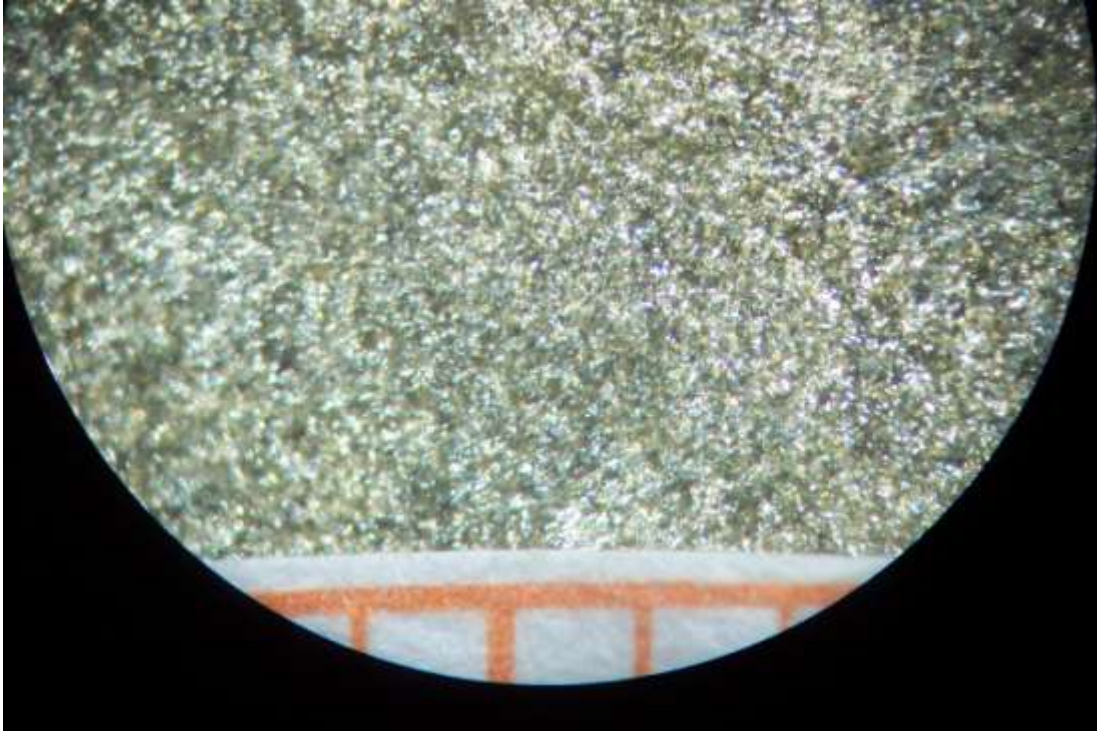


Fig. 10 Partículas del silbato bucal de obsidiana dorada, iluminadas con luz de sol.

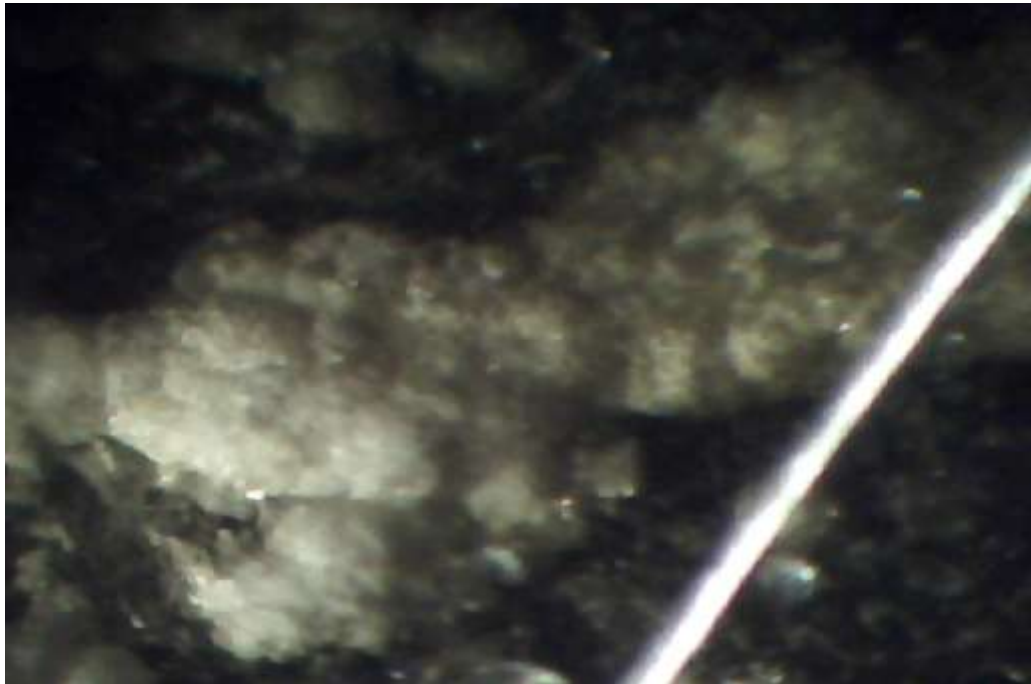


Fig. 11. Fotomicrografía superficial del silbato bucal de obsidiana dorada con una cana.



Fig. 12. Lija usada de carburo de silicio grado 400.

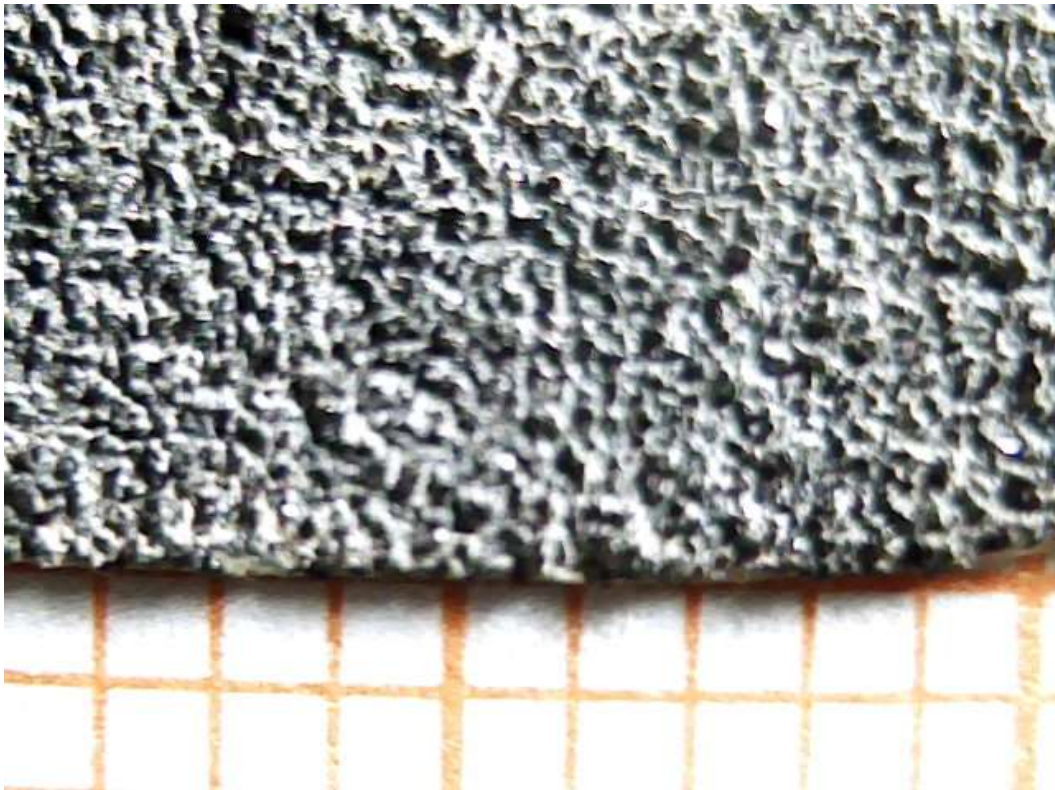


Fig. 13. Fotomicrografía de lija usada de carburo de silicio de grado 120.

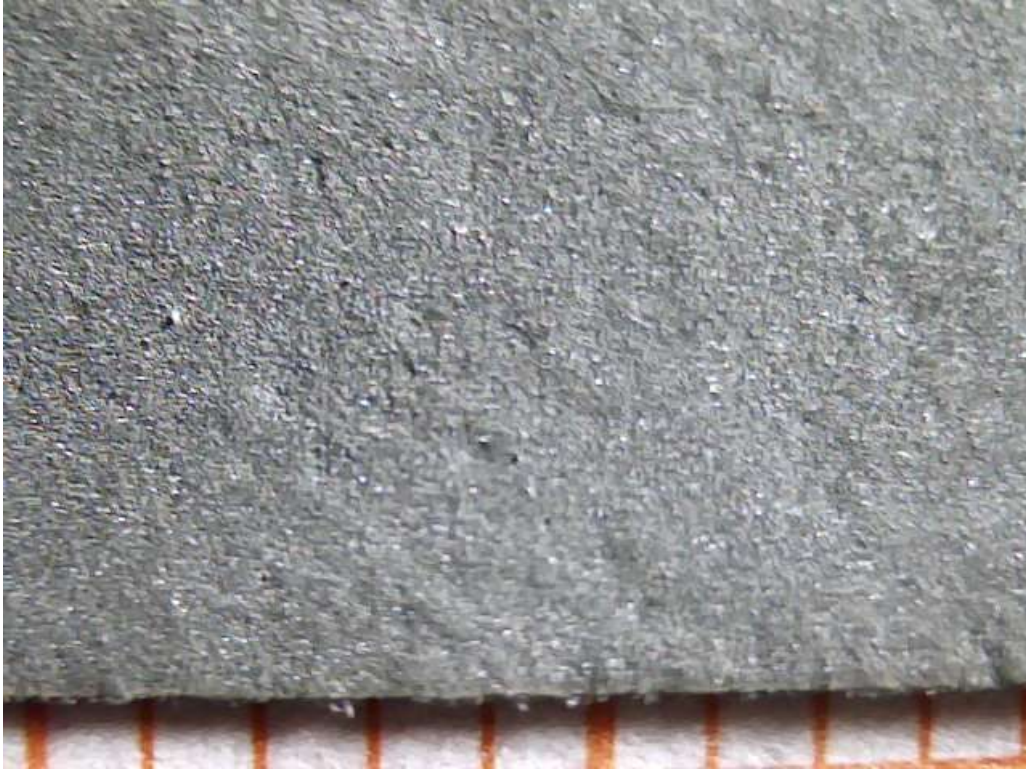


Fig. 14. Fotomicrografía de lija nueva de carburo de silicio de grado 2000.



Fig. 15. Dedos reflejados en la superficie pulida de la pieza de obsidiana negra.

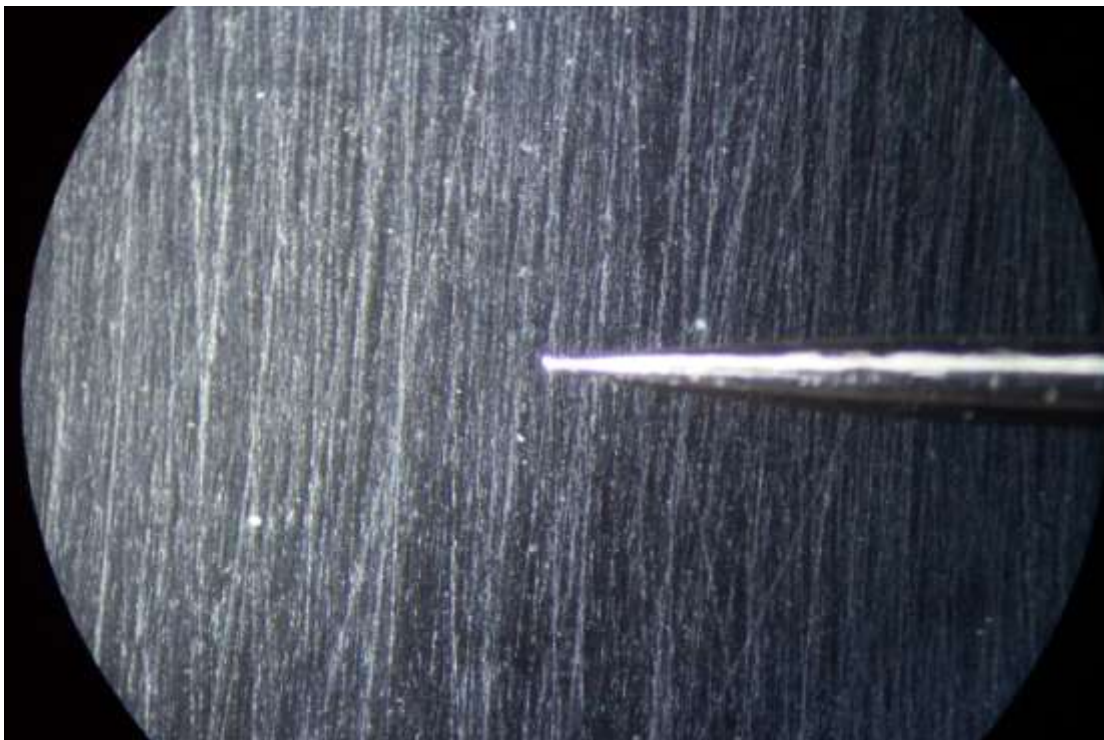


Fig. 16. Rayas en obsidiana con lija de carburo de silicio grado 280, con una aguja.



Fig. 17 Superficie de la lija usada de grado 280.

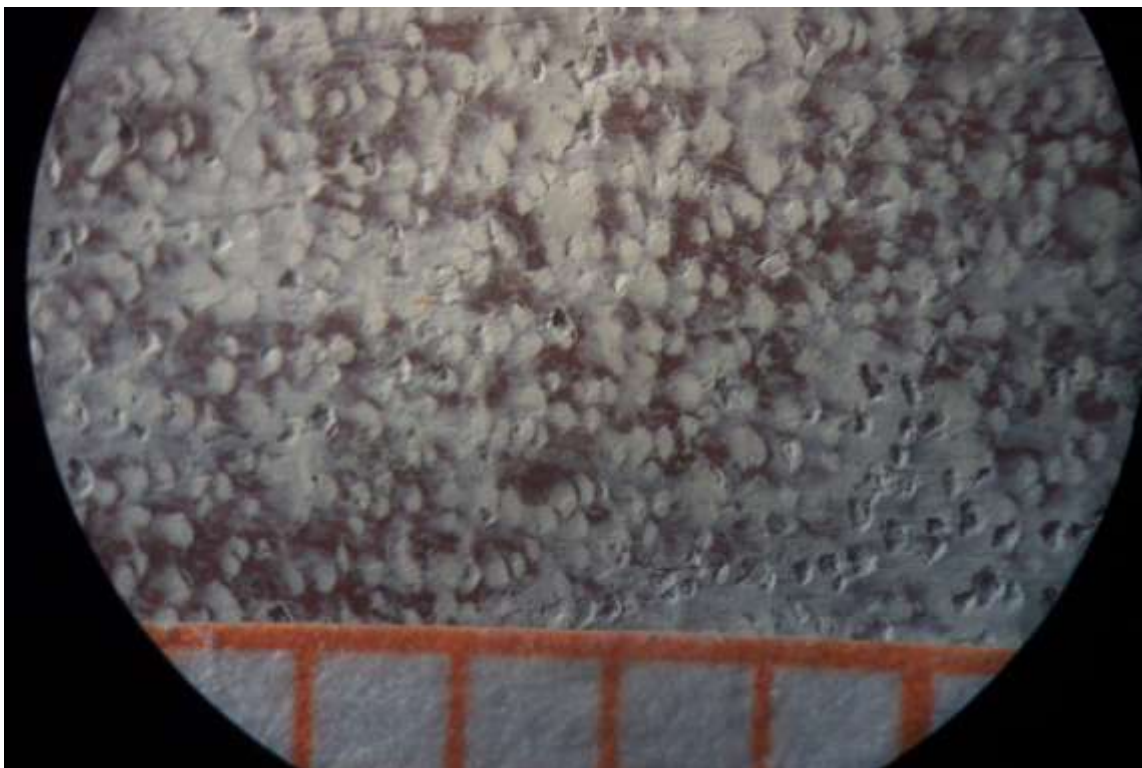


Fig. 18. Superficie del cuero con oxido de aluminio usados para pulir la obsidiana.