



PRUEBAS DE INFLAMABILIDAD DEL MAGNESIO

Laboratorio de Termodinámica Experimental del
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del
Instituto Politécnico Nacional.

REPORTE

Marzo de 2017

PRUEBAS DE INFLAMABILIDAD DEL MAGNESIO.

Objetivo: Mostrar la diferencia en las características de inflamabilidad del magnesio en polvo y el magnesio en lingote.

Fundamentación del Protocolo

Todos los metales del grupo I y II de la tabla periódica son susceptibles de quemarse con más o con menos dificultad, pero todos ellos en partículas pequeñas se incendian fácilmente. Se dice que los metales del grupo II (berilio, magnesio, calcio, estroncio, bario y radio) pueden ser explosivos. Sin embargo para ello deben converger tres condiciones: a) que el metal se encuentre en forma de polvos o partículas finamente divididas, b) que las partículas del polvo se encuentren suspendidas y estabilizadas en el aire y c) que el proceso sea promovido por algún iniciador, tal como una chispa, una descarga eléctrica, el calentamiento o una flama.

Si bien las partículas finas pueden ser quemadas con alguna facilidad, a medida que las dimensiones geométricas del material se incrementan (por ejem. en el caso de una lámina o un lingote), la combustión del magnesio metálico se vuelve más difícil ya que como indicamos arriba, la alta conductividad térmica del metal hace que la temperatura de ignición se alcance más difícilmente, aun cuando la fuente de calor sea muy importante.

De esta manera, el protocolo seguido en esta demostración incluye las pruebas de inflamabilidad de diversas muestras, preparadas en el laboratorio a partir del material provisto por la compañía Autoliv, como se describe con detalle en este reporte. Asimismo, el protocolo no incluye pruebas de explosividad de material finamente pulverizado (en partículas de tamaño menor a un micrómetro), ya que se sabe que éste se puede preparar si se dispone de la tecnología especializada para ello, con objeto de observar su explosividad y por lo tanto no hay nada que investigar al respecto. Las condiciones y normas para realizar pruebas de explosividad, requieren de equipo e instalaciones especializadas y un protocolo que se describe brevemente en el Apéndice I de este reporte.

Es de señalar que en el caso de partículas de mayor tamaño o bien láminas, listones, barras o lingotes de magnesio, las pruebas de explosividad resultan intrascendentes porque lo único que puede ocurrir es la eventual combustión del material, si las condiciones experimentales así lo permiten, pero también es seguro que no ocurrirá la explosión del magnesio en esas presentaciones.

El Magnesio

El magnesio es un metal alcalinotérreo, de masa atómica 24.312 y número atómico 12 y forma parte del grupo IIA de la tabla periódica. Su configuración electrónica es $[\text{Ne}] 3\text{S}^2$. Es decir, tiene dos electrones de valencia ubicados en el orbital 3S, además de los electrones de la configuración del gas noble Neón. En consecuencia

los únicos estados de valencia son 0 y +2, lo que simplifica la química de este elemento. Asimismo, esta configuración electrónica es característica, ya que los dos electrones más externos pueden ser fácilmente excitados a niveles superiores y al recuperar el estado basal, emiten energía que permite fácilmente su identificación. Esta emisión de energía en forma de luz es la responsable de la luminosidad durante la incandescencia del magnesio. El primero y segundo potencial de ionización son relativamente bajos, 7.64 y 15.03 eV, respectivamente. De esta manera los compuestos químicos que forma son de naturaleza covalente. Su punto de fusión se ubica en 651° C y el de ebullición en 1107° C (*Chemistry, Principles and applications*, P.A. Rock y G.A. Gerhold, Saunders Co., London 1974). El magnesio junto con los metales del mismo grupo y los metales alcalinos son frecuentemente llamados metales combustibles. Los metales alcalinos en contacto con la humedad del aire se pueden quemar fácilmente y en contacto con el agua del medio ambiente producen hidrógeno y este eventualmente explotar. En el caso de los alcalinotérreos, el magnesio es el más fácil de quemar y su incandescencia de color muy blanco brillante indica que la temperatura que se alcanza es de al menos 1500° C. La radiación emitida está en el intervalo visible del espectro electromagnético y principalmente en la región del ultravioleta. La demostración segura de la inflamabilidad del magnesio, que es muy espectacular, requiere tomar las medidas adecuadas a este respecto.

El magnesio es el octavo elemento químico más abundante en la corteza terrestre y el tercero en el agua de mar, solamente superado por el cloro y el sodio. Para dar una idea de lo que significa la abundancia del magnesio, el tratamiento de 1000 metros cúbicos de agua de mar (del orden de 1000 toneladas) produjeron 1500 kilos de hidróxido de magnesio (*Chemistry and Technology of Magnesia*, M.A. Shand, Wiley Interscience New Jersey, 2006), equivalentes a 600 kilos de magnesio puro.

Es muy afortunado que el magnesio con tal abundancia, desde hace décadas haya encontrado muy diversas aplicaciones tecnológicas de gran alcance económico y tecnológico, incluidas las de los primeros dispositivos electrónicos, hasta la muy conocida y expandida como fuente de iluminación para cámaras fotográficas. Es un metal de baja densidad y alta conductividad, de manera que puede ser usado para mejorar las propiedades de las aleaciones. La densidad del magnesio es 1.74 g cm⁻³. Es decir, 30 % más ligero que el aluminio, cuatro veces más ligero que el hierro, zinc y cromo, siete veces más ligero que la plata y doce veces más ligero que el platino.

Esta característica se aprovecha extensamente desde hace al menos cinco décadas en la industria de autopartes y partes de aviones e incluso misiles y propulsores. Para aprovechar esa misma característica se han desarrollado aleaciones de base magnesio, principalmente con aluminio para producir materiales muy ligeros y con propiedades mecánicas extraordinarias, por ejemplo la dureza, rigidez y fuerza de tensión, así como la estabilidad frente a la corrosión. El incorporar más piezas de aleaciones base aluminio en automóviles y aviones conduce a una disminución del consumo de combustibles lo que va en favor del medio ambiente y de la economía. Actualmente el magnesio encuentra una aplicación

extraordinariamente amplia ya que es el material usado en las carcasas de computadoras y teléfonos móviles. Solo estas aplicaciones, proporcionan una idea de la importancia del magnesio en el impulso a la economía de cualquier país. Ya sea que éste produzca la materia prima o los bienes o sólo consuma ambas cosas. Adicionalmente una aplicación actual, conocida desde la antigüedad, es la del hidróxido de magnesio como antiácido. Este producto disponible en las farmacias, después de algún tratamiento químico, es una buena fuente de magnesio. Reciclar las cubiertas de computadoras y teléfonos móviles es una fuente directa de magnesio.

Parte Experimental

Seguridad

Para la preparación de muestras se siguen esencialmente las recomendaciones de la NADCA (*North American Die Casting Association*) *Combustible Dust in Industry: Preventing and Mitigating the Effects of Fire and Explosions, Safety and Health Information Bulletin SHIB07-31-2005 updated 11-12-2014, Occupational Safety and Health Administration*, medidas propias que se consideraron adecuadas, como se describe a continuación:

- a) Las herramientas deben ser muy afiladas y no deben girar sin cortar o sacar virutas del material, ya que la fricción puede elevar la temperatura e incendiar el material.
- b) En cualquier procedimiento es necesario evitar el calentamiento del material y no usar agua o fluidos que pudieran promover la generación de hidrógeno sobre la superficie del metal con el que se trabaja.
- c) Las herramientas deben ser de un ángulo de corte de al menos 45°.
- d) El material debe ser colectado en un recipiente metálico de buena conductividad térmica y el material residual debe ser recuperado de inmediato sobre todo si se trata de polvo fino.
- e) Se debe evitar que el polvo fino se disperse en el aire ya que eso si puede resultar peligroso. Se debe mantener limpia la zona de trabajo y se evita el uso de aspiradoras si estas no están especialmente diseñadas para recolectar magnesio.
- f) Se prohíbe fumar en la zona y se evita cualquier flama o chispa eléctrica.
- g) Las personas que manejan el material deben usar bata y lentes de protección y cubre-bocas en el caso de material más finamente dividido.

Los experimentos de inflamabilidad se realizaron al interior de una campana de extracción y el personal utilizó la ropa y accesorios de protección necesarios para asegurar su integridad ante cualquier propagación imprevista de metal incandescente y ante la emisión de luz ultravioleta asociada a la combustión del material ensayado.

Descripción del Material estudiado

El material estudiado fue el proporcionado por la empresa Autoliv, que consistió de dos lingotes de dimensiones aproximadas de (12 X 6 X 60) cm y de masa aproximada de 7.5 kilos, los cuales venían etiquetados como: Magnesio Virgen Regal AM50, con número de parte 629961100A y grabado de fundición sobre el lingote, el número 161623321-1 y Magnesio Reciclado Amacot AM50 con número de parte 629961101A, sin grabado de fundición. La Figura 1 corresponde a la imagen de las muestras recibidas para su estudio.

De ambos lingotes se extrajeron muestras representativas del volumen del mismo y no de la superficie, lo que representa mejor su contenido y propiedades ya que la superficie es espontáneamente oxidada por el aire. Para extraer las muestras se utilizaron brocas Forstner, espada y Auger de cinco a diecinueve mm, para obtener diferente tamaño y geometría de las partículas. La Figura 2 corresponde a la imagen del material obtenido y el dispositivo utilizado para ello. En la Figura 3a y 3b, se presentan las dimensiones de las muestras obtenidas. De cada lingote y a través de un corte transversal, se obtuvo un bloque de aproximadamente (12 X 6 X 4) cm, los cuales se presentan en la Figura 4. Este bloque es quince veces menor que el lingote completo. El material residual producto del corte de dichos bloques se consideró como la muestra de polvo más fino que se podía obtener y se presenta en la Figura 5. La imagen de microscopía óptica de dichas partículas corresponde a la Figura 6 y da una idea del tamaño de las mismas. La dispersión de tamaño de partícula va de 5 a 200 micrómetros.

Composición Química

Muestras de cada lingote fueron estudiadas por espectrometría de fluorescencia de Rayos X (FRX), con objeto de establecer su composición química. Los resultados de tales análisis se documentan en el Apéndice II. El lingote virgen Regal tiene una composición de 96.65 % en magnesio y el lingote reciclado Amacot, tiene una composición de 96.05 % en magnesio. Lo que significa que durante el proceso de manufactura, recuperación, fusión y formación de un lingote reciclado, el material fue tratado con las suficientes precauciones técnicas como para no alterar significativamente su composición química. Asimismo se confirma que el material de ambos lingotes no es magnesio de alta pureza, sino de una aleación que contiene principalmente magnesio y aluminio.

Pruebas de inflamabilidad

Las muestras de inflamabilidad se practicaron sobre las muestras obtenidas del material proporcionado descrito arriba y se desarrollaron de la siguiente manera:

En una campana de extracción completamente vacía y limpia, se colocó un soporte metálico con una pinza ajustable de manera que ésta pudiera sujetar una malla de acero inoxidable sobre la cual soportar las muestras sólidas en forma de virutas del material a estudiar. Abajo del soporte y de la malla se colocó una placa rectangular

(20 x 30) cm, de acero inoxidable de 6 mm de espesor, con el objeto de asegurar que cualquier residuo incandescente del material que pudiera caer de la malla se enfriara inmediatamente y se autoextinguiera, eliminando con ello cualquier posible accidente. Adicionalmente, al interior de la campana se colocó un recipiente de arena secada a 500° C y un accesorio para utilizarla en caso de cualquier incidente. Un extintor de polvo químico estaba inmediatamente a disposición en caso necesario. Un solo experimentador colocó las muestras sobre la malla de acero inoxidable y llevó a cabo la ignición de las mismas, con ayuda de una simple antorcha de uso doméstico y protegido con la vestimenta obtenida de la Compañía Infra y una careta de respuesta automática que le permitió observar la ignición y la combustión completa, sin riesgo alguno. Otro operador, realizó las tomas de video y uno más asistía con el posible uso del extintor o la arena.

En el caso del material polvo de magnesio, éste no es posible suspenderlo en la malla metálica y por ello sobre de ésta se colocó un rectángulo de papel filtro sobre el cual se soportó el polvo del material de ensayo. La combustión se inicia y propaga fácilmente y es posible observar la incandescencia de las partículas en lo individual. La combustión y la propagación de la misma en el magnesio es más rápida que en el papel, esta característica se aprovecha para realizar exitosamente la combustión del material.

Para realizar la prueba de combustibilidad del magnesio en lingote sólido, se consideró conveniente y más seguro realizarlo sobre un bloque extraído de él y no sobre el lingote completo. Las pruebas en este caso se realizaron al exterior del laboratorio en un espacio libre de materiales combustibles y alejado de instalaciones eléctricas y otros posibles materiales combustibles y sustancias químicas. La seguridad de los operadores fue estrictamente cuidada y los materiales de extinción siempre estuvieron al alcance inmediato. En este caso el bloque en estudio fue colocado sobre un tabique cerámico y éste sobre una placa cerámica recocida a alta temperatura. El objetivo era impedir la fuga térmica ya que la cerámica es de baja conductividad térmica y así el bloque de magnesio podría ser calentado más fácilmente o sometido a condiciones más severas. Una vez preparado todo el experimento el bloque de magnesio fue sometido a la acción de un soplete de butano-aire por espacio de diez minutos. El material no presentó defectos durante su preparación de fábrica, lo que hace que no se desprendan partículas incandescentes de él que pudieran promover la ignición. Durante el experimento, no se observó ningún indicio de combustión del material y por consiguiente, si no hubo combustión, mucho menos pudiera ocurrir la explosión del material sólido. El bloque solamente se calentó, pero lo principal es que aún con una flama importante el material no se quema.

Se realizó también un experimento comparativo que consistió en colocar virutas de magnesio sobre el bloque de magnesio. Al aplicar la flama del soplete de butano aire, lo que se observa es que las virutas más expuestas al aire o más alejadas del bloque, se queman y producen la incandescencia. La mayor parte de las virutas lentamente se transformó en el óxido de magnesio lo que significa la combustión sin flama o sin incandescencia del magnesio.

Para mostrar la forma de disponer de los desechos o material residual recuperado de la preparación de las muestras, recuperadas en papel y cinta adhesiva, éstas se quemaron con ayuda del soplete hasta su consumo total. Ningún riesgo de incendio fuera de control o explosión ocurrió durante este proceso.

Todos los experimentos aquí descritos fueron video-grabados y el material se registró en un disco compacto. El disco se adiciona como parte integral de este reporte.

Conclusiones

Los experimentos realizados como se describe en la parte experimental y como se hace evidente en las fotografías y videos que son parte integrante del presente reporte, conducen a las siguientes conclusiones:

a) La ignición de material en virutas se puede lograr fácilmente con ayuda de una antorcha de uso doméstico. Soportar las virutas en una malla metálica facilita la combustión ya que la baja conductividad térmica de la malla impide el enfriamiento de la muestra. Cualquier dispositivo que opere bajo este principio conduce a la ignición exitosa del magnesio.

b) En el material en virutas más delgadas el inicio y la propagación del fuego es más rápido en comparación con las virutas más gruesas, tal como se muestra en el material videográfico.

c) El comportamiento de las muestras de las mismas características geométricas, fue similar, independiente del lingote del que provenían. Esto era de esperarse ya que la composición química de ambos lingotes es prácticamente la misma.

d) En el caso del polvo de magnesio, éste no es posible suspenderlo en la malla metálica y por ello se sustituyó por el papel filtro. La combustión se inicia y propaga fácilmente y es posible observar la incandescencia de las partículas en lo individual. La combustión y la propagación de la misma en el magnesio es más rápida que en el papel, de otra manera no se suspendería en él. Ningún indicio de explosión se presentó durante los experimentos de polvo de magnesio de cada uno de los lingotes.

e) Las pruebas realizadas sobre bloques masivos de magnesio, no obstante el haber utilizado un soplete de flama muy energética, conduce solamente al calentamiento del bloque pero no a la ignición, no se desprendieron partículas incandescentes y no se observó la oxidación lenta del magnesio ya que no se presentaron cenizas sobre la superficie. Desde luego el lingote completo es aun más difícil que se incendie ya que con un bloque quince veces más pequeño esto no se logró. Si la combustión del magnesio en lingote no ocurre cuando es sometido a la acción de un soplete, la explosión del mismo no ocurrirá por esa misma acción.

En general, a medida que las dimensiones geométricas de las muestras de magnesio aumentan, la facilidad para quemarlo disminuye. Esto es debido a que hay un efecto compensado por la conductividad térmica del metal que se ve incrementada y con ello el calentamiento se vuelve más difícil (*International Programme on Chemical Safety IPCS, Magnesium ICSC: 0289*).

f) El magnesio es un metal que tiene una temperatura de autoignición (473°C) más baja que su temperatura de fusión (651°C), por esta razón el metal sólido puede incendiarse. Cuando este se encuentra en listones y polvo, es fácilmente inflamable. Cuando se encuentra como partículas finamente divididas con tamaño de partícula menor a un micrómetro, puede ser explosivo, pero para ello es necesario que las partículas se estabilicen en el aire y la presencia de un iniciador. La explosión de partículas finamente divididas no ocurre espontáneamente.

g) Cuando el magnesio se encuentra en forma de lingotes, no es inflamable ni explosivo. El manejo, transporte, almacenamiento y maquinado, requiere de la observación estricta de protocolos de seguridad, de acuerdo a su presentación.

h) Si el magnesio está en forma de un lingote de dimensiones como el del presente estudio ($12 \times 6 \times 60$) cm, difícilmente se va a incendiar ya que se requeriría una fuente de calor muy poderosa para lograrlo. Esto es lo que hace posible el transporte y almacenamiento con bajo riesgo y lo único que se requiere es protegerlo de la humedad y la insolación.

i) La característica especial del magnesio es que se puede inflamar muy fácilmente si se trata de virutas o listones delgados y se produce una incandescencia espectacular, pero el aluminio, cercano en la tabla periódica de los elementos, con número atómico 13, configuración electrónica $[\text{Ne}]3s^23p^1$, es tanto o más explosivo que el magnesio y es un metal de uso muy amplio y fácilmente obtenible a muy bajo costo. El sencillo sistema aluminio-agua es utilizado como propulsor de retorno en vehículos espaciales.

<https://books.google.com.mx/books?id=CiUqyDrm1OYC&pg=PA1021&lpg=PA1021&dq=aluminio+como+explosivo&source=bl&ots=1c4jljfAFF&sig=Uy6XcKorUfzCcADQvL51I2LsCcg&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiGmu6YltzRAhWHx4MKHT8JD6MQ6AEIRjAG-v=onepage&q=aluminio como explosivo&f=th>

El aluminio que se usa como explosivo también debe estar como polvo muy fino y de muy alta pureza.

j) El caso del magnesio es análogo al del aluminio, se puede usar para preparar explosivos, pero el material debe ser de alta pureza. Este no es el caso de los lingotes estudiados, ya que como se describe en este reporte, estos contienen magnesio al 96%, que no pueden ser considerados de alta pureza.

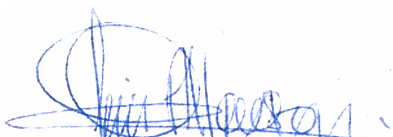
k) El hecho de que el material reciclado y el virgen sean de la misma composición, indica que materiales de contenido del 96 % en magnesio serían fácilmente

obtenibles ya que están ampliamente difundidas como material de reciclaje de autopartes (monoblocks, rines, transmisiones, etc.) o carcasas de computadoras o teléfonos celulares, a bajo costo.

Los experimentos descritos y el presente reporte fueron realizados en laboratorio de Termodinámica Experimental del Departamento de Química del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N. Las muestras utilizadas para realizar las pruebas aquí descritas se conservarán en este laboratorio, por un año contado a partir de la fecha de este reporte, para cualquier verificación.

El presente reporte consta de nueve páginas, incluida la carátula, de dos apéndices, seis figuras y un disco compacto con material videográfico.

Los abajo firmantes declaran que lo aquí descrito se apega estrictamente a la revisión bibliográfica existente en la literatura internacional y a lo observado durante los experimentos realizados.



Dr. Luis Alfonso Torres Gómez
Investigador Cinvestav 3D



Quím. Myriam Campos Ruiz de Peña
Auxiliar de Investigación

En la Ciudad de México, a los 24 días del mes de marzo de 2017

Apéndice I

ASTM Designation: E1226-12a, Standard Test Method for Explosibility of Dust Clouds.

La Norma ASTM E1226 – 12a está especialmente diseñada para realizar pruebas de explosividad de polvos de materiales combustibles suspendidos en el aire. El propósito es estandarizar el método experimental para determinar si un material en forma de una nube de partículas finas suspendidas en el aire son susceptibles de explotar si se provoca la ignición en ella. Si es el caso, entonces determina como conocer el grado de explosividad. Para realizar este tipo de pruebas es necesario un recipiente metálico de unos 20 dm^3 de pared muy gruesa y en el que es posible introducir el polvo fino, por ejemplo de magnesio. El sistema tiene un sistema de admisión de aire a presión (puede ser oxígeno puro si se desea promover más fácilmente la combustión), el polvo se dispersa y en ese momento se dispara la ignición por la producción de una chispa eléctrica realizada por una descarga o la fricción de un piezoeléctrico. El sistema incorpora un manómetro que es capaz de registrar el incremento de la presión en función del tiempo con lo que se determina el máximo de la rapidez del incremento de la presión a volumen fijo, $(dP/dt)_{\text{max}}$ y la presión máxima alcanzada en el proceso, P_{max} . A partir de los datos colectados en el experimento se calcula también el índice de deflagración $KSt = dP/dt_{\text{max}} V^{1/3}$, normalizado a un metro cúbico, que es indicativo del daño que puede producir el material si se promueve su explosión. Los polvos explosivos producen una presión máxima de algunos bar, el máximo de la rapidez del incremento de la presión se ubica en algunas centenas de bar/s y el índice de deflagración en alrededor de cien bar m/s. La ejecución de experimentos de esta naturaleza requiere de espacios e instalaciones especiales en lugares aislados y poco frecuentados.

Instalaciones para procesar magnesio deben cumplir con normas del tipo establecido por la recomendación NFPA® 484. (NFPA 484 Standard for Combustible Metals, 2015 Edition).

Referencia: 13372

FECHAS

Entrega	07/02/2017
---------	------------

Analistas: Berlanda Alvarado Norma Alicia

LIC. ANA CARMINA FUENTES RAMOS

LIC. MA. DEL SOCORRO GARCIA GUILLERMO

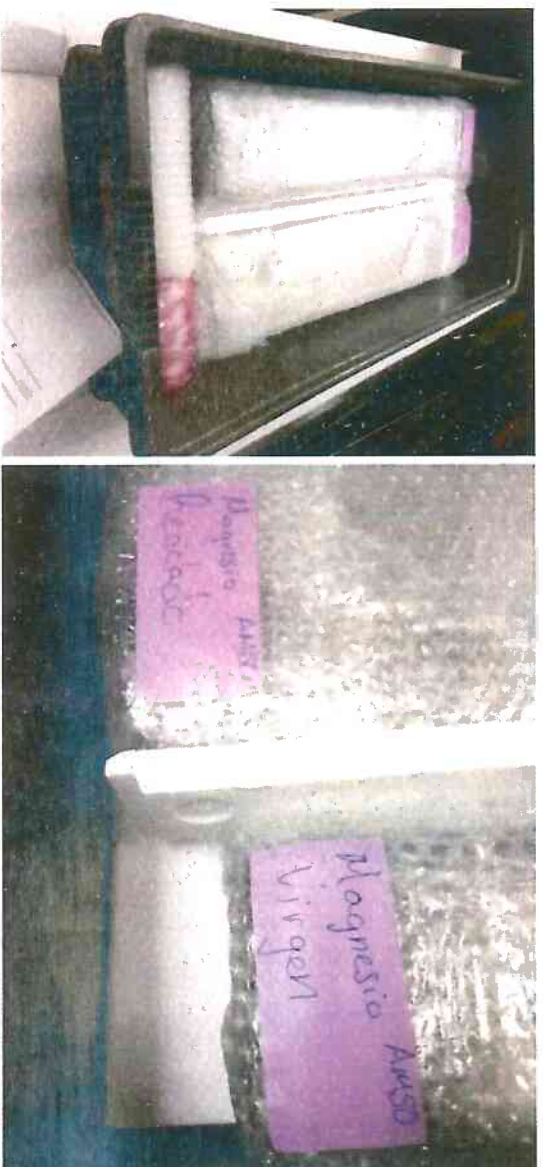


Figura 1. Lingotes de magnesio Virgen Regal y magnesio Reciclado Amacot.

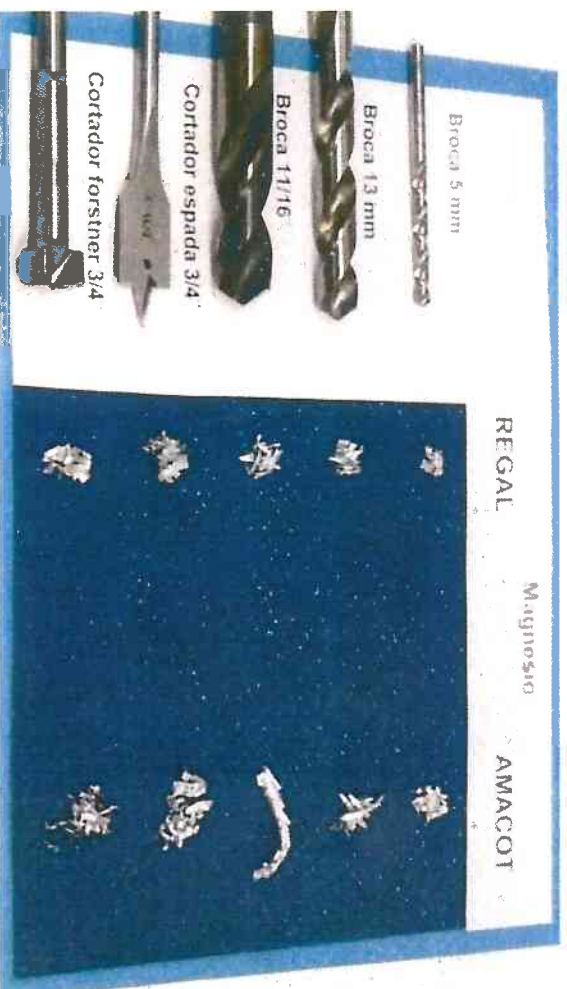


Figura 2. Dispositivos utilizados para la obtención de las muestras.

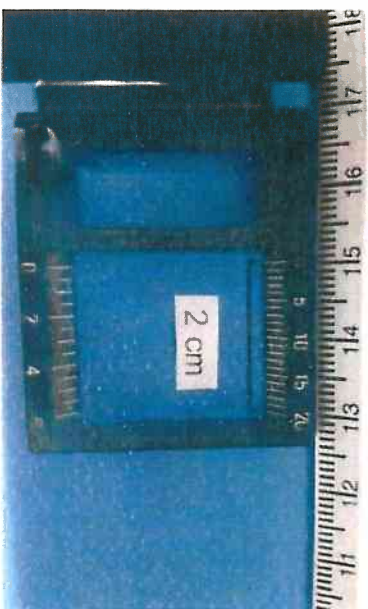


Figura 3a. Dimensiones de las muestras obtenidas para el magnesio Virgen Regal

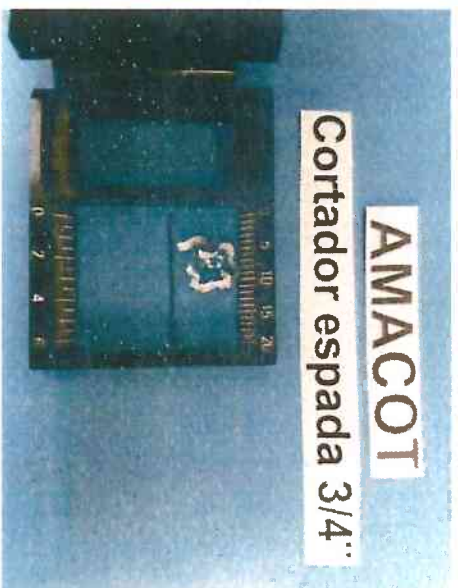
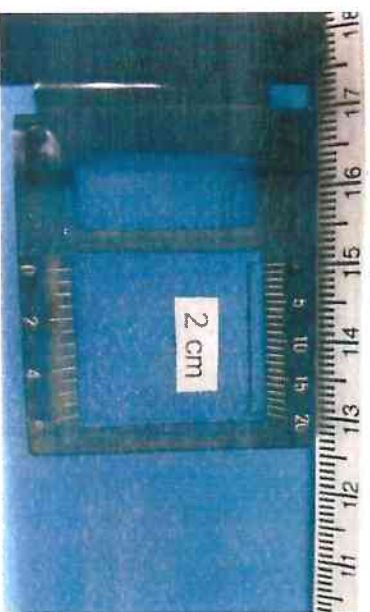


Figura 3b. Dimensiones de las muestras obtenidas para el magnesio Reciclado Amacot



Figura 4. Corte transversal del lingote de magnesio Regal y Amacot



Figura 5. El material residual del corte de los bloques es el polvo fino empleado para las pruebas de ignición.



Figura 6. Imagen de la microscopía óptica del polvo obtenido de los lingotes Regal y Amacot