

con guía
detallada
de
materiales



EL ARTE DE LA TRITURACIÓN

UN INFORME ESPECIALIZADO SOBRE LA TRITURACIÓN Y
HOMOGENEIZACIÓN DE MUESTRAS PARA ANÁLISIS EN EL LABORATORIO

Copyright © 2026 by RETSCH GmbH, Haan.

Todos los derechos reservados, en particular los de reproducción, distribución y traducción.

Ninguna parte de esta obra podrá reproducirse de forma alguna, ni procesarse, reproducirse o distribuirse mediante sistemas electrónicos sin la autorización escrita de RETSCH GmbH.

Nota de traducción: los pasajes resaltados en amarillo requieren aclaración o confirmación del original alemán. Los comentarios de Word explican cada caso. Se conserva la correspondencia con las páginas de la fuente; las fuentes terminológicas figuran después del texto traducido.

CONTENIDO

	Página
1. ¿Por qué se realiza la trituration?	4
2. El proceso de trituration	7
2.1. Preparación de muestras	7
División de muestras	8
Secado.....	9
Separación de metales	10
Fragilización con nitrógeno líquido o hielo seco	10
2.2. Principios de trituration	11
Materiales duros y frágiles.....	12
Materiales blandos, elásticos y fibrosos.....	13
2.3. Herramientas de molienda	14
2.4. Auxiliares de molienda.....	18
3. Gama de productos RETSCH	20
3.1. Trituradoras de mandíbulas.....	21
3.2. Molinos de rotor	22
3.3. Molinos de corte y de cuchillas	25
3.4. Molinos de discos	27
3.5. Molinos de mortero	28
3.6. Molinos de bolas	28
3.7. Sistemas de ciclón	34
4. Aplicaciones especiales	36
4.1. Disrupción celular y homogeneización de tejidos	36
4.2. Mecanoquímica.....	37
5. Consideraciones finales	40
Anexo: consejos prácticos para la molienda con molinos de bolas	42-45
Anexo: descripción de los materiales	46-73
Explicaciones	74-77

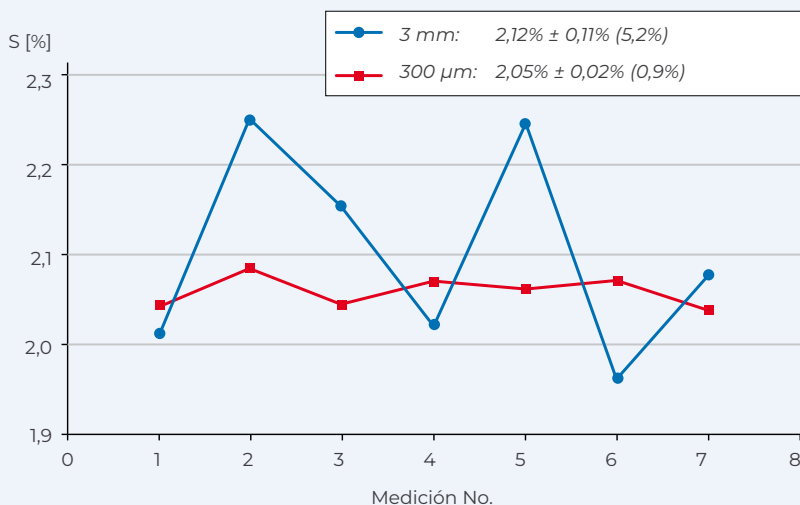
1. ¿Por qué se realiza la tritución?

Unos resultados analíticos fiables y precisos requieren una preparación reproducible de las muestras. «El arte de la tritución» presenta los pasos necesarios para transformar una muestra de laboratorio en una fracción representativa con una finura analítica homogénea.

Para ello, RETSCH ofrece una amplia gama de modernos molinos y trituradoras de laboratorio para la tritución gruesa y la molienda fina y ultrafina de cualquier material sólido. La extensa selección de herramientas de molienda y accesorios permite preparar las muestras sin introducir contaminación que interfiera en el análisis y adaptarse a los requisitos de cada aplicación, por ejemplo, materiales de construcción, metalurgia, alimentos, productos farmacéuticos o medio ambiente.

Es necesario tritutar los sólidos o materiales a granel cuando su granulometría resulta demasiado gruesa para los procesos posteriores, como el análisis, la división, la mezcla o el procesamiento. La tritución y homogeneización de la muestra pueden reducir considerablemente las desviaciones estándar de los análisis posteriores (véase el gráfico).

Influencia del tamaño de partícula en la reproducibilidad de los análisis



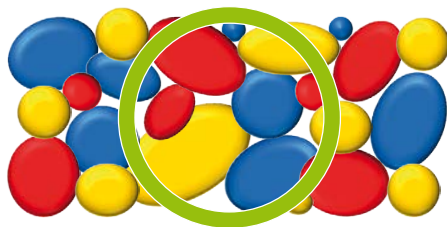
Una muestra de caucho se tritutoró hasta obtener distintos tamaños de partícula. Cuanto menor es el tamaño de partícula, más homogénea es la muestra. La posterior determinación del contenido de azufre, realizada con un analizador ELTRA CS-580, muestra que la desviación estándar disminuye al aumentar la homogeneidad de la muestra (línea roja): los resultados analíticos son más reproducibles.

Finura analítica necesaria

Un objetivo frecuente de la trituration es: “Molido hasta obtener polvo fino”. Sin embargo, el término “polvo” no es inequívoco. El detergente en polvo, el café en polvo y el polvo para hornear son materiales a granel que, aunque todos llevan la denominación de “polvo”, presentan distribuciones de tamaño de partícula muy diferentes. Otro pedido que se hace frecuentemente es el de triturar las muestras de laboratorio a granulometrías “tan finas como sea posible”. Para ello, sin embargo, siempre se requieren aportes de energía altos o una inversión de tiempo elevada. El tiempo y la energía también representan costos en el trabajo de laboratorio. Un enfoque más efectivo es: No tan fino como sea posible, sino tan fino como sea necesario. Esto suele ser determinado por el análisis posterior.

Homogeneización

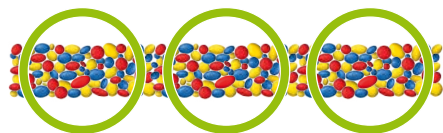
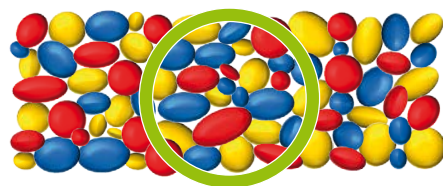
Para la realización de un análisis, generalmente solo se requieren algunos gramos o miligramos de material de muestra de una muestra de laboratorio. Si la muestra de laboratorio es heterogénea, no es necesariamente representativa de la muestra completa, ya que algunos componentes pueden estar subrepresentados y otros sobrerrepresentados. Algunos pueden faltar por completo. Por lo tanto, para garantizar resultados de análisis representativos, es imprescindible utilizar una muestra de laboratorio homogénea.



Granulometría para análisis

Las granulometrías requeridas para el análisis son muy diversas y varían según el método analítico o proceso posterior. El rango granulométrico apropiado para la mayoría de las técnicas analíticas se encuentra entre 20 μm y 2 mm.

Como propiedades del producto tales como la capacidad de extracción, filtración o absorción dependen en gran medida del tamaño de partícula, la trituration a escala de laboratorio constituye una base importante para desarrollar productos y procesos.



Únicamente una muestra homogénea es representativa de la muestra completa y garantiza resultados de análisis fiables y reproducibles.

Factores que influyen en la elección del molino adecuado

Al seleccionar un molino de laboratorio y sus herramientas de molienda, es esencial asegurarse de que el proceso de trituración no altere las propiedades de la muestra que se van a analizar, como la humedad o el contenido de metales pesados. Para elegir correctamente se necesitan conocimientos profundos de los equipos disponibles y una amplia experiencia en la preparación de muestras de distintos materiales.

Para encontrar el molino ideal para una aplicación concreta, conviene considerar previamente los siguientes aspectos:

- | Calidad y propiedades de la muestra: seca, tenaz, abrasiva, fibrosa, frágil, dura, blanda, termosensible, etc.
- | Granulometría inicial.
- | Granulometría final requerida.
- | Volumen de muestra.
- | Rendimiento de procesamiento de muestras.
- | Método de análisis posterior: qué tipo de contaminación por desgaste de las herramientas de molienda resulta admisible.
- | Necesidad de secar o fragilizar la muestra antes de molerla.
- | Y, sin olvidar lo esencial: ¿es representativa la muestra?

Según las propiedades de la muestra, pueden aplicarse diferentes principios de trituración para alcanzar la finura analítica requerida. Las partículas grandes no siempre pueden reducirse a dicha finura en una sola etapa. A veces es necesario realizar una trituración gruesa y una molienda fina en el mismo molino. En determinados casos se necesitan dos molinos distintos.

2. El proceso de trituración

Para conseguir una trituración eficaz, el mecanismo de acción del equipo debe adaptarse al comportamiento de fractura del material (véase el apartado 2.2). Por tanto, al seleccionar un equipo o antes de iniciar la preparación, es necesario examinar detenidamente el material. Deben comprobarse su densidad, dureza y consistencia, así como la posible humedad residual o el contenido de grasa. La sensibilidad a la temperatura, la tendencia a aglomerarse o las reacciones superficiales también pueden influir en el resultado de la molienda.

En todos los casos debe tenerse en cuenta el análisis posterior.

2.1. Preparación de muestras

Antes de iniciar la trituración, debe comprobarse si la muestra puede procesarse sin tratamiento previo. La humedad, los aglomerados, la segregación o los cuerpos extraños podrían dificultar el trabajo y falsear el resultado de la trituración.

También debe considerarse la cantidad de muestra: ¿cuánta se necesita para el análisis posterior? ¿Cuál es, en comparación, la cantidad inicial y qué granulometría presenta? Estos parámetros determinan el tamaño mínimo de una fracción representativa. Una fracción es representativa cuando tiene la misma composición que la muestra total.



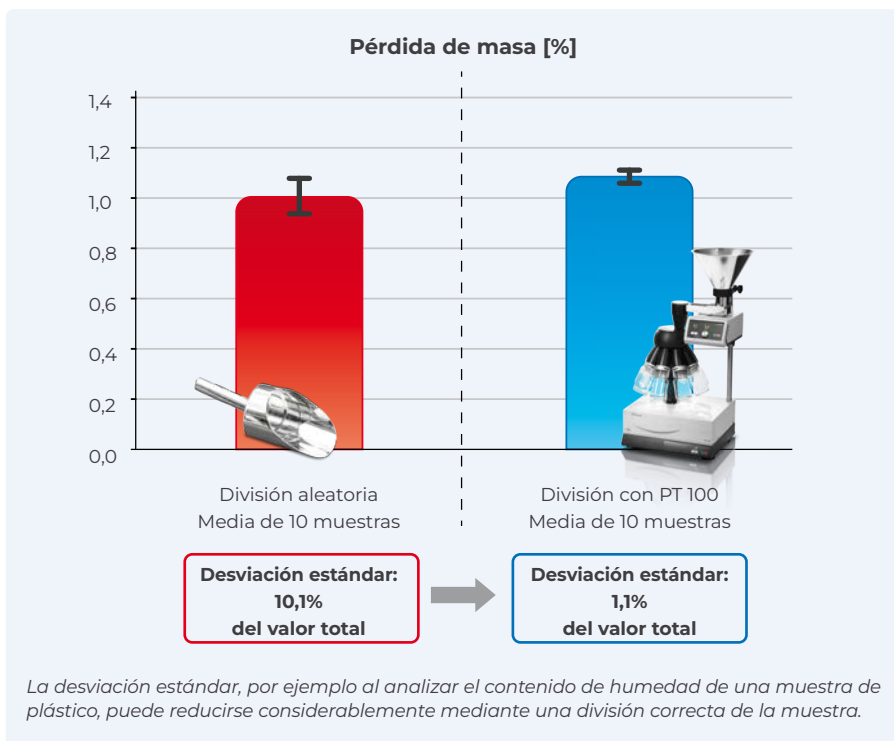
*Distintos divisores
de muestras.*

División de muestras

La mayoría de las muestras de laboratorio son mezclas heterogéneas. Durante el transporte pueden segregarse si sus partículas presentan diferentes tamaños y densidades. Si no se muele la muestra completa, debe tomarse una fracción representativa.

Si la granulometría inicial es demasiado gruesa, la división se realiza después de triturar previamente toda la muestra de laboratorio. La elección del método y del equipo de división depende del material y de la cantidad. Las muestras secas y de buena fluidez pueden alimentarse mediante alimentadores vibratorios y dividirse en divisores de tubo rotativo o divisores con cabezal giratorio. Los divisores acanalados se emplean para materiales de menor fluidez.

El muestreo manual aleatorio solo resulta admisible cuando cabe suponer que la muestra es homogénea en cuanto a composición y tamaño de partícula, algo que suele ser difícil de demostrar sin estudios previos.



Secado

La trititación de muestras húmedas o mojadas, especialmente en trituradoras de mandíbulas y molinos de rotor o de discos, produce efectos secundarios indeseados. El material húmedo se adhiere a la cámara de molienda, obstruye los tamices anulares y de fondo y puede atascar el equipo. Esto provoca pérdidas de material y aumenta el trabajo de limpieza.

Las excepciones son las moliendas coloidales, que se realizan añadiendo líquidos en molinos de bolas, y las frutas y verduras frescas, que pueden homogeneizarse sin pérdidas de material en molinos de cuchillas.

No obstante, en la mayoría de los casos las muestras húmedas, como las hojas, deben secarse antes de triturarlas. Al elegir el método y la temperatura de secado, debe evitarse alterar las propiedades que se van a determinar. Esto resulta especialmente importante para los compuestos volátiles, como furanos, hidrocarburos clorados (p. ej., PCB) y dioxinas. A menudo estas muestras solo pueden secarse al aire a temperatura ambiente.

La secadora rápida TG 200 de RETSCH permite un secado rápido y suave. Al igual que las secadoras industriales, utiliza el principio de lecho fluidizado. Para muchos productos, el tiempo de secado es de tan solo 5 a 20 minutos.

Otras opciones son el secado al vacío, la liofilización y el secado en estufa.



Secadora rápida
TG 200

Separación de metales

Muchas muestras, especialmente del ámbito medioambiental, como residuos comerciales, materiales residuales valorizables, combustibles secundarios y residuos de vertedero, pueden contener metales que los equipos destinados a su trititación no pueden pulverizar. Por el contrario, los cuerpos metálicos extraños, como clavos de acero o tornillos de hierro, pueden dañar las herramientas y reducir mucho el rendimiento del molino. Por ello, los componentes metálicos deben separarse antes de la preparación y, si es necesario, evaluarse por separado.



Refrigeración con nitrógeno líquido

Fragilización con nitrógeno líquido o hielo seco

La refrigeración suele mejorar el comportamiento de fractura del material. Por eso, para la trititación previa y la molienda fina de muestras termosensibles, como muchos plásticos, es necesaria una refrigeración directa intensa. Una posibilidad consiste en fragilizar previamente la muestra en nitrógeno líquido (N_2 , LN). A $-196^\circ C$, incluso el caucho blando se vuelve tan duro y frágil que puede trititarse sin dificultad por impacto y fricción. En la refrigeración indirecta, el recipiente de molienda lleno se sumerge en nitrógeno líquido. Otra posibilidad es mezclar la muestra con hielo seco (CO_2).

La molienda criogénica también se utiliza para retener los componentes volátiles en la muestra.

Los materiales que no deben humedecerse no deben tratarse con refrigerantes. A bajas temperaturas, la humedad del aire se condensa sobre la muestra y modifica su contenido de humedad.

No deben utilizarse refrigerantes dentro de juegos de molienda cerrados, ya que su evaporación genera sobrepresión en el recipiente.

2.2. Principios de trituración

Los distintos tipos de molinos emplean diferentes principios de trituración. La elección práctica de un molino siempre depende del comportamiento de fractura del material. Los productos duros y frágiles pueden triturarse por impacto, presión y fricción; los materiales blandos y elásticos a menudo solo pueden reducirse eficazmente por corte y cizallamiento.

Los equipos para la trituración de materiales gruesos, es decir, piezas mayores de 40 mm, se denominan trituradoras o desgarradoras. Para granulometrías inferiores se utilizan molinos.

Las páginas siguientes muestran los distintos mecanismos de acción empleados para triturar sólidos.



Trituración de materiales duros y frágiles



Animación

Acción por presión

Esfuerzo entre dos superficies, que pueden ser las de las herramientas de molienda o las de partículas contiguas. Las herramientas ejercen la presión.

Ejemplos:

Trituradoras de mandíbulas y trituradoras de rodillos.



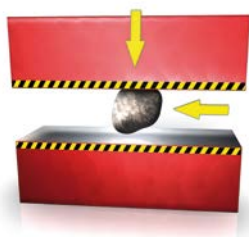
Animación

Acción por impacto

Esfuerzo sobre una superficie sólida, que puede pertenecer a una herramienta de molienda o a otras partículas. El impacto se produce principalmente por la aceleración de las partículas contra una superficie o unas contra otras.

Ejemplos:

Molinos mezcladores, molinos planetarios de bolas, molinos de impacto, molinos de chorro de aire y molinos de tambor.



Animación

Acción por fricción

Esfuerzo entre dos superficies sólidas. La fricción se genera al ejercer presión perpendicular sobre una de ellas mientras esta se desplaza horizontalmente respecto a la otra.

Ejemplos:

Molinos de mortero, molinos de discos, morteros manuales, morteros de trituración, molinos de barras y molinos planetarios de bolas.

Trituración de materiales blandos elásticos y fibrosos

Acción por cizallamiento

Esfuerzo entre dos o más superficies sólidas que se desplazan una respecto a otra y producen un efecto de cizallamiento. Al menos una superficie es móvil y otra permanece fija.

Ejemplos:

Molinos de impacto de rotor, molinos de impacto de palas y molinos ultra-centrífugos.



Animación

Acción por corte

Esfuerzo entre dos o más superficies con bordes afilados. Al menos un filo permanece fijo y otro es móvil.

Ejemplos:

Desgarradoras, molinos de corte y molinos de cuchillas.



Animación

Los mecanismos de trituración suelen actuar combinados: por ejemplo, presión y fricción en los molinos de mortero, o cizallamiento e impacto en los molinos de rotor.

2.3. Herramientas de molienda

Las herramientas de cada molino RETSCH están optimizadas en cuanto a funcionalidad y manejo. Sin embargo, las numerosas aplicaciones plantean requisitos diferentes. Por ello, existe una amplia gama de accesorios que permite ofrecer una solución adecuada para cada tarea de trituración. Por ejemplo, los molinos de bolas y de discos vibratorios disponen de juegos de molienda de distintos tamaños según la cantidad de muestra. Los tamices o rotores de distancia permiten preparar materiales termosensibles en molinos de rotor.

Además, todos los molinos ofrecen herramientas de molienda de distintos materiales.

Materiales

Los materiales utilizados en las herramientas de molienda RETSCH se dividen en los siguientes grupos:

- | Metales: distintos tipos de acero, hierro fundido, Ni-Hard 4 y titanio.
- | Cerámicas: carburo de tungsteno, óxido de circonio, óxido de aluminio sinterizado y porcelana dura.
- | Piedra natural: ágata.
- | Plásticos: PTFE, PC, PMMA y PP.

Los materiales disponibles para cada molino dependen de sus propiedades químicas y físicas. El acero, un material «universal», se ofrece para las herramientas de todos los molinos.



Recipientes y bolas de molienda para molinos planetarios de bolas.

La siguiente tabla ofrece una orientación sobre la dureza, el aporte de energía y la resistencia al desgaste. El documento «Material Analyses of Equipment & Accessories», disponible en nuestra web, recoge las posibles contaminaciones por desgaste y datos detallados de dureza y densidad de las herramientas (véase también la página 75).

Material	Dureza**	Densidad [g/cm ³]**	Aporte de energía*	Resistencia al desgaste*
Acero inoxidable	48-52 HRC (aprox. 550 HV)	7,8	●●●●○ muy alto	●●○○○ limitada
Acero inoxidable 316 L	185-215 HBW	7,9	●●●●○ muy alto	●●●○○ buena
Acero endurecido	58-63 HRC (aprox. 750 HV)	7,85	●●●●○ muy alto	●●●○○ buena
Hierro fundido	135-185 HBW 30	7,2 - 8,5	No aplicable	●●○○○ limitada
Ni-Hard 4	Aprox. 550-700 HBW	7,75	No aplicable	●●●●● muy buena
Titanio	120-310 HBW	4,45	No aplicable	●●○○○ limitada
Carburo de tungsteno	Aprox. 1250 HV	14,8	●●●●● máximo	●●●●● muy buena
Óxido de circonio	Duro y frágil; más tenaz que el ágata. 7,5 Mohs (aprox. 1200 HV)	5,9	●●●○○ alto	●●●●● muy buena
Óxido de aluminio sinterizado	Duro y frágil. 8-8,5 Mohs (aprox. 1750 HV)	3,9	●○○○○ bajo	●●●○○ buena
Porcelana dura	Aprox. 1200 HV; 5,8 Mohs (aprox. 1200 HV)	2,4	No aplicable	●●●○○ buena
Ágata	Dura y frágil. 6,5-7 Mohs (aprox. 1000 HV)	2,65	○○○○○ muy bajo	●●○○○ limitada
PTFE	Elástico. Dureza Shore D 56	2,1	○○○○○ muy bajo	○○○○○ baja

*En molinos de bolas, molinos de discos vibratorios o el XRD-Mill McCrone. La escala 0/5-5/5 reproduce los cinco indicadores gráficos del original.

**Los valores exactos pueden variar según la herramienta de molienda. Los análisis detallados, incluidos los componentes minoritarios, figuran en el PDF «Material Analyses of Equipment & Accessories», en www.retsch.com.



Mandíbulas de trituración para trituradoras de mandíbulas (izquierda) y rotores para molinos ultracentrífugos (derecha).

Al seleccionar un juego de molienda deben considerarse varios aspectos. La dureza de la muestra y su comportamiento de fractura son determinantes. Siempre que sea posible, el material del juego debe ser más duro que la muestra para limitar el desgaste. Por ejemplo, para triturar arena de cuarzo debe utilizarse un juego de óxido de circonio, más duro, en lugar de uno de ágata.

La resistencia al desgaste indica la capacidad de cada material para resistir la abrasión. El carburo de tungsteno y el óxido de circonio presentan el menor desgaste. No obstante, la cantidad de material desprendido también depende de las propiedades de la muestra y del mecanismo de acción del sistema de trituración.

En los procesos de trituración mediante fuerzas mecánicas no es posible descartar por completo el desgaste. Por ello, al elegir un material debe tenerse en cuenta que la posible contaminación no perjudique al producto ni al análisis posterior; por ejemplo, el aporte de cromo y níquel del acero si se van a analizar metales pesados.

Otro factor importante en los molinos de bolas y de discos vibratorios es el aporte de energía de los distintos materiales de los juegos de molienda. Debido a su mayor densidad, las bolas de carburo de tungsteno proporcionan mucha más energía y, por tanto, una mayor eficacia de trituración que bolas del mismo tamaño fabricadas con otros materiales.

Algunos ejemplos de aplicación

- | Para detectar trazas de hierro, cromo o cobalto en muestras de suelo, no deben utilizarse herramientas de acero inoxidable ni de acero endurecido, pues estos aceros contienen, entre otros, los elementos que se desean determinar.
- | En cambio, el clínker de cemento puede prepararse en juegos de estos aceros para determinar calcio y óxido de silicio.
- | El PTFE, el óxido de circonio y el vidrio pueden esterilizarse, por lo que se utilizan con frecuencia en química alimentaria y microbiología.
- | El desgaste también importa cuando la muestra molida se procesa posteriormente sin análisis. Por ejemplo, los productos homeopáticos, los principios activos en lactosa y los productos farmacéuticos solo deben prepararse con morteros cerámicos o juegos de ágata, para evitar la incorporación de sustancias no deseadas.
- | Para evitar cambios de color, las muestras claras no deben molerse con herramientas de acero o WC, ya que estas pueden teñirlas de gris. Materiales como el ágata, el óxido de circonio o el óxido de aluminio sinterizado ofrecen ventajas en este caso.

En el anexo se recopila información detallada sobre cada material.

2.4. Auxiliares de molienda

Muchas tareas de trituración habituales en la ingeniería de procesos mecánicos pueden resolverse con distintos tipos de molinos y sus respectivos mecanismos de acción. Sin embargo, algunas aplicaciones no se resuelven fácilmente con molinos de laboratorio convencionales, incluso con una amplia gama de accesorios. Resultan especialmente problemáticos los materiales con humedad residual que no pueden secarse. También pueden presentar dificultades las materias primas con aceite o grasa y los productos blandos y elásticos. La molienda ultrafina, destinada a obtener polvos ultrafinos mediante aporte de energía mecánica, a menudo solo puede realizarse en húmedo.

En estos casos debe estudiarse el uso de auxiliares de molienda. Son aditivos que activan, aceleran o mejoran procesos químicos y físicos. Antes de utilizarlos en la preparación de muestras sólidas, debe garantizarse que no perjudican el análisis ni los procesos posteriores.

Los auxiliares de molienda se clasifican según los tres estados de agregación:

- | Sólidos: polvos, granulados o pellets para fijar grasa o humedad, por ejemplo, talco.
- | Líquidos: agua, alcoholes o fracciones de petróleo ligeras para evitar aglomerados.
- | Gaseosos: gases inertes o aire refrigerado.

Y, adicionalmente:

- | Control de temperatura: refrigeración con nitrógeno líquido o hielo seco y calentamiento.



Aditivos sólidos

En la preparación de muestras para fluorescencia de rayos X, es habitual añadir pellets que no interfieren en el análisis, como Spectromelt, de base celulósica, durante la molienda en molinos planetarios de bolas o de discos vibratorios. En la proporción correcta, favorecen la trititación y evitan adherencias dentro de los recipientes. Este auxiliar actúa además como aglutinante en la posterior peletización del material molido.

En el procesamiento de insectos, pequeños animales marinos y suelos húmedos, añadir sulfato de sodio es un método habitual para fijar la grasa y la humedad que se determinarán después. La trititación se realiza en molinos de mortero y garantiza la recuperación completa del material.



Aditivos líquidos

Muchas semillas oleaginosas, como colza, soja o mostaza, pueden homogeneizarse en molinos de bolas o de mortero añadiendo éter de petróleo. Este se emplea como líquido de extracción para determinar después el contenido de aceite.

La obtención de productos ultrafinos, por ejemplo en la industria cerámica, la pulvi-metalurgia o la mineralogía, a menudo solo es posible mediante molienda en húmedo. Como medios de dispersión se utilizan principalmente agua o alcoholes sencillos*. La molienda en húmedo se realiza sobre todo en molinos de bolas o de mortero.



Aditivos gaseosos

Una ventilación suficiente del sistema de trititación mediante separadores ciclónicos o filtros adecuados evacua continuamente el calor de fricción. Así se reduce el calentamiento del material y aumenta el rendimiento.

La introducción de gases inertes durante la molienda evita que las partículas con superficies reactivas entren en contacto con el oxígeno del aire y previene, por ejemplo, oxidaciones no deseadas.

*Respete las medidas de seguridad necesarias al manipular sustancias fácilmente inflamables.

3. Gama de productos RETSCH

La gama RETSCH abarca desde equipos para la trituración previa de partículas de varios centímetros hasta la molienda fina en el rango nanométrico. La elección del molino o los molinos adecuados depende de varios criterios:

- | Propiedades de la muestra, por ejemplo, su comportamiento de fractura.
- | Granulometría inicial.
- | Granulometría final deseada.
- | Cantidad de muestra alimentada.

Si la muestra inicial es gruesa, pueden necesitarse dos molinos, uno para la trituración previa y otro para la molienda fina, para alcanzar la finura analítica. También debe elegirse un juego de molienda adecuado (apartado 2.3), considerando especialmente su dureza, resistencia al desgaste y posible contaminación y, en molinos de bolas y de discos vibratorios, el aporte de energía.

Equipo	Materiales		Mecanismo
	Duros y frágiles	Blandos, elásticos y fibrosos	
Trituradora de mandíbulas	■		Presión
Molino ultracentrífugo		●	Impacto, cizallamiento
Molino de impacto de palas; molino de martillos	■ ●		Impacto, cizallamiento
Molino de impacto de rotor	●	■ ●	Impacto, cizallamiento
Molino de corte		■	Cizallamiento, corte
Molino de cuchillas		●	Corte, impacto
Molino de mortero	●		Presión, fricción
Molino de discos vibratorios	●	●	Presión, fricción
Molino de bolas	●	●	Impacto, fricción
Molino de tambor	●	●	Impacto, fricción
Molino de barras	●	●	Fricción

■ trituración previa ● molienda fina

3.1. Trituradoras de mandíbulas

Las trituradoras de mandíbulas se emplean para la trituración previa de productos secos, duros y frágiles, como menas, minerales, escorias y carbón, y también para triturar muestras metálicas.

Se ofrecen siete tamaños: los modelos de suelo BB 200, BB 250, BB 300, BB 400, BB 500 y BB 600, y el modelo de sobremesa BB 50. Mientras la BB 600 tritura partículas de hasta 17×35 cm, la granulometría inicial máxima de la BB 50 es de 4 cm. A cambio, la BB 50 alcanza granulometrías finales de unos 0,5 mm, frente a los aproximadamente 6 mm de la BB 600. La granulometría final depende sobre todo de la abertura ajustable entre las mandíbulas.

Al aumentar el tamaño de la trituradora, también aumenta el rendimiento de procesamiento. Así, la BB 300 y, especialmente, la BB 600 alcanzan rendimientos elevados ($>3,5$ t/h), según el material y la abertura seleccionada. Cuatro modelos son adecuados para el funcionamiento en línea, con trituración continua: BB 200, BB 300, BB 500 y BB 600.

Para las BB 50, BB 250, BB 400 y BB 500 se ofrece un ciclón opcional que reduce o evita la emisión de polvo. Según la muestra y la abertura, también mejora la descarga, incluida la fracción fina.

Las mandíbulas y las chapas antidesgaste que delimitan lateralmente la cámara de trituración están disponibles en siete materiales, según el modelo: acero al manganeso, acero inoxidable, acero endurecido, acero para trituración sin metales pesados, carburo de tungsteno, óxido de circonio y Ni-Hard 4.



Trituradora de mandíbulas
BB 50



Trituradora de mandíbulas
BB 600

3.2. Molinos de rotor

El molino ultracentrífugo ZM 300 se utiliza principalmente para la molienda fina de materiales blandos, semiduros, frágiles y fibrosos, como fertilizantes, plásticos o pellets para piensos. Para triturar plásticos elastoplásticos puede ser necesario fragilizar previamente la muestra con nitrógeno líquido.

En el ZM 300, la trituración se produce por impacto y cizallamiento entre el tamiz anular y el rotor. La granulometría inicial máxima es de 10 mm. Según el material, se alcanzan finuras $<40\text{ }\mu\text{m}$. La granulometría final se determina mediante tamices anulares intercambiables. La velocidad puede ajustarse entre 6000 y 23 000 min^{-1} . El recipiente colector extraíble garantiza pérdidas mínimas de muestra y facilita la limpieza.

Para alimentar de forma uniforme y automática materiales de buena fluidez, se recomienda el alimentador DR 100. Para cantidades mayores resulta adecuado un ciclón con recipiente colector de 3 o 5 l. También puede ser necesario utilizar un ciclón con materiales termosensibles, pues mejora la evacuación del calor de fricción generado durante la molienda (apartado 3.7). Como alternativa a los tamices anulares estándar, pueden utilizarse tamices de distancia, con mayor separación respecto al rotor, para reducir el calor de fricción.



Molino ultracentrífugo ZM 300

Para la trituración sin metales pesados se ofrecen tamices anulares y rotores de titanio. Para materiales más duros y abrasivos puede ser necesario un rotor recubierto de carburo de tungsteno.

El molino de martillos HM 200 se utiliza para la trituración gruesa y previa y para desaglomerar muestras semiduras, duras, frágiles, tenaces y fibrosas. Tritura de forma fiable grandes cantidades, con alto rendimiento, hasta una granulometría final definida. Es ideal para laboratorio y planta piloto y procesa, entre otros, menas, minerales, cerámica, escoria, tierra, carbón, vidrio, clínker de cemento, madera, plásticos, pellets para piensos, piensos secos y hierbas secas.

El HM 200 incorpora un eje horizontal giratorio con diez martillos de oscilación libre. La muestra se tritura por impacto y cizallamiento. Los martillos articulados reducen el riesgo de bloqueo y minimizan el desgaste. Cuando el material alcanza la finura necesaria, atraviesa el tamiz y pasa al recipiente colector por la salida gravitatoria.

Su construcción robusta admite granulometrías iniciales de hasta 100 mm y finales inferiores a 0,8 mm. Con un rendimiento de hasta 1500 kg/h, permite trabajar por lotes o de forma continua. Su velocidad de 3000 min⁻¹ y los tamices de 0,5 a 40 mm permiten adaptar el tamaño de partícula.

Distintas tolvas y sistemas colectores, incluidas tolvas estándar y para materiales alargados y recipientes de 10 o 30 l, cubren diferentes necesidades. La salida gravitatoria facilita el funcionamiento continuo. La aspiración de polvo y el sistema de ciclón opcional permiten trabajar con limpieza y recuperar una elevada proporción de muestra.



Molino de martillos HM 200

El molino de impacto de rotor SR 300 permite la trituration previa y la molienda fina de materiales blandos a semiduros y frágiles, con dureza de hasta 4 Mohs y granulometría inicial de 25 mm. La granulometría final se ajusta mediante tamices anulares intercambiables y, según el material, puede ser inferior a 50 μm . Sus aplicaciones típicas incluyen cereales, carbón, productos químicos y suelos. La trituration se produce por impacto y cizallamiento entre el rotor y el tamiz anular. Para la trituration previa de materiales más duros puede utilizarse una pieza molturadora de 180°. La velocidad se sitúa entre 3000 y 10 000 min^{-1} . Una mayor velocidad aumenta el rendimiento, pero también el calentamiento de la muestra. Por ello, para productos termosensibles puede emplearse un rotor de distancia. El ciclón opcional reduce el polvo y el calentamiento y aumenta el rendimiento.

El molino de impacto de palas SK 300 es adecuado para la trituration previa y la molienda fina de materiales semiduros y frágiles de hasta 6 Mohs, como menas, minerales y clínker de cemento, con granulometrías iniciales de hasta 25 mm. La finura final se determina mediante tamices de fondo intercambiables con distintas aberturas. El material se tritura por impacto y cizallamiento entre las placas de impacto del rotor y la pieza molturadora. Las partículas que alcanzan la finura deseada atraviesan el tamiz de fondo. El SK 300 está disponible en versiones de hierro fundido, acero inoxidable, acero endurecido y acero para trituration sin metales pesados. También se ofrece un ciclón. La velocidad puede ajustarse entre 2000 y 4000 min^{-1} .



*Molino de impacto de rotor
SR 300 con ciclón*



*Molino de impacto de palas
SK 300*

3.3. Molinos de corte y de cuchillas

Los molinos de corte SM 50, SM 100, SM 200 y SM 300 trituran materiales voluminosos, blandos y fibrosos, como ramas, paja o plásticos. El SM 50, un modelo compacto de sobremesa, resulta especialmente adecuado para pequeñas cantidades, el trabajo cotidiano y los laboratorios con poco espacio. Se utiliza principalmente para trituration previa, aunque, según el material y el tamiz de fondo, también alcanza finuras aptas para el análisis, del rango milimétrico al submilimétrico. Su ciclón integrado mejora el transporte, la descarga y la refrigeración de la muestra; la cámara de molienda extraíble facilita la limpieza.

Los modelos mayores, SM 100, SM 200 y SM 300, están diseñados para rendimientos y cantidades superiores y materiales más exigentes. El SM 300 incorpora una masa de inercia adicional y resulta especialmente adecuado para materiales tenaces, como cuero, caucho, combustibles secundarios o residuos electrónicos. Su velocidad puede ajustarse libremente entre 100 y 3000 min⁻¹.

La finura alcanzable depende del tamiz de fondo y del comportamiento de fractura del material. Hay distintos rotores: uno de corte paralelo para materiales blandos, elásticos y fibrosos; uno de seis discos (tres en el SM 50) con placas de corte de carburo de tungsteno para aplicaciones más exigentes; y, para el SM 300, un rotor en V para materiales tenaces, blandos y fibrosos. También se ofrecen rotores, insertos de puerta y tamices de fondo de distintos aceros, incluidos los destinados a trituration sin metales pesados.



Molino de corte SM 50



Molino de corte SM 300

Los molinos de cuchillas GRINDOMIX GM 200 y GM 300 trituran y homogeneizan, por impacto o corte, prácticamente todas las muestras con grasa, aceite o agua.

Su uso está muy extendido en el control de alimentos y cumple, por ejemplo, los requisitos de grado de molienda del § 35 de la LMBG. El GM 200 procesa cantidades de 300 a 700 ml, mientras que el GM 300 homogeneiza hasta 4500 ml.

Se ofrecen diversos accesorios. Los recipientes estándar de los GM 200 y GM 300 son de policarbonato. Para aplicaciones más exigentes o criogénicas puede utilizarse un recipiente de acero inoxidable. Todos los recipientes son autoclavables.

La tapa de caída libre adapta el volumen de la cámara de molienda a la cantidad de muestra. Para productos con agua puede utilizarse una tapa de caída libre con canales de rebose, que devuelven el líquido al interior por los laterales. También se ofrecen cuchillas que no interfieren en el análisis para triturar y homogeneizar sin metales pesados.



Molinos de cuchillas
GRINDOMIX GM 200 y GM 300.

3.4. Molinos de discos

Los molinos de discos vibratorios RS 200 y RS 300 se emplean con frecuencia para preparar muestras para fluorescencia de rayos X (FRX). Son adecuados para la molienda fina de materiales semiduros a duros, como escorias, menas, clínker de cemento y minerales, con una granulometría inicial máxima de 20 mm. Según el material y los parámetros, se alcanzan granulometrías finales de hasta 20 μm ; normalmente basta con 1-2 minutos para obtener una finura analítica <100 μm . Los juegos de molienda están disponibles en distintos volúmenes, de 50 a 2000 ml, y en hasta seis materiales, según el modelo.

La trituración se produce por presión y fricción entre el recipiente, el disco y el anillo de molienda, mediante un movimiento circular horizontal. El RS 200 ofrece una velocidad ajustable de 700 a 1500 min^{-1} ; el RS 300 funciona a una velocidad fija de 912 min^{-1} y requiere aire comprimido para sujetar el juego de molienda y accionar el elevador automático opcional.

El molino de discos DM 200 permite la trituración previa y la molienda fina de materiales duros y frágiles. La trituración se produce por presión y fricción entre dos discos, uno fijo y otro giratorio. La granulometría inicial máxima también es de 20 mm; la final, de hasta 0,05 mm, se ajusta mediante la abertura entre discos. Los discos de molienda están disponibles en cuatro materiales.



Molino de discos vibratorios RS 200 (izquierda) y molino de discos DM 200 (derecha).



*Molino de mortero
RM 200*

3.5. Molinos de mortero

Los molinos de mortero se utilizan para moler, mezclar y triturar materiales blandos a duros y frágiles. Su cierre estanco al polvo también permite realizar moliendas en húmedo y criogénicas y triturar pastas.

La trituración se produce por presión y fricción entre el mortero y la mano. La presión de contacto de la mano se ajusta manualmente. También pueden reajustarse las posiciones del rascador y de la mano.

El molino de mortero RM 200 de RETSCH tiene un volumen útil de 10 a 190 ml. La granulometría inicial máxima es de unos

8 mm. Según las propiedades del material, alcanza granulometrías finales de hasta 10 μ m. Se ofrecen juegos de molienda en siete materiales.

3.6. Molinos de bolas

Los molinos de bolas se emplean principalmente para la molienda fina de muestras duras y frágiles. Su versatilidad constituye una ventaja esencial: los recipientes y las bolas están disponibles en distintos tamaños y materiales, incluidos materiales no metálicos. Esto es especialmente importante para aplicaciones como el análisis de metales pesados, donde se utilizan, por ejemplo, óxido de circonio o ágata.

El juego de molienda consta de un recipiente y bolas del mismo material. Como regla general, un tercio del volumen de la cámara se llena con bolas y otro tercio con muestra. El tamaño de bola depende de la granulometría inicial y de la finura final deseada: para partículas de hasta 10 mm pueden necesitarse bolas de 30 mm; en la molienda coloidal hasta el rango micrométrico o nanométrico suelen emplearse bolas ≤ 3 mm.

Los recipientes de los molinos de bolas tienen cierre estanco al polvo y también son adecuados para la molienda en húmedo.

Los molinos planetarios de bolas están disponibles en cuatro versiones: PM 100, con un puesto de molienda; PM 200 y PM 300, con dos; y PM 400, con cuatro. Los recipientes se ofrecen en cinco materiales y en volúmenes de 12 a 500 ml. La granulometría inicial máxima es de 10 mm y, en seco, pueden alcanzarse finuras de unos 10 μm .

Las finuras <10 μm , hasta el rango nanométrico, suelen obtenerse mediante molienda en húmedo, generalmente con bolas pequeñas, por ejemplo, de 3 mm de diámetro. Se llena con bolas aproximadamente el 60% del recipiente y se añade un medio de dispersión, como agua o alcohol*, que no debe alterar químicamente la muestra. Debido al posible aumento de temperatura y presión durante moliendas prolongadas, se requiere un cierre de seguridad.

Los recipientes están dispuestos de forma excéntrica sobre la rueda principal, que gira en sentido contrario a los recipientes, con una relación de 1:-2. La trituration se produce por fricción e impacto.

Los molinos planetarios de bolas RETSCH también son adecuados para la aleación mecánica, es decir, la obtención de nuevos compuestos a partir de polvos metálicos o de óxidos metálicos. Para los mayores aportes de energía necesarios se ofrece el PM 400 MA, con relaciones de velocidad de 1:-2,5 o 1:-3.



*Molino planetarios de bolas
PM 100*



*Molino planetarios de bolas
PM 400*

*Respete las medidas de seguridad necesarias al manipular sustancias fácilmente inflamables.

Para moler pequeñas cantidades de muestra resultan adecuados los molinos mezcladores RETSCH. Los cinco modelos abarcan desde el equipo básico hasta el sistema de altas prestaciones: MM 400, MM 500 vario, MM 500 nano, MM 500 control y CryoMill. Todos utilizan oscilaciones de alta frecuencia para triturar eficazmente las muestras mediante fuerzas de impacto y fricción. Admiten una amplia variedad de materiales y aplicaciones de laboratorio.

El MM 400 es el modelo básico de eficacia probada, con frecuencias de hasta 30 Hz y granulometrías finales de unos 5 μm . Destaca por su robustez y facilidad de uso.



Puestos de molienda del MM 500 vario

El MM 500 vario ofrece mayor rendimiento con seis puestos de molienda y hasta 50 muestras simultáneas, a frecuencias de hasta 35 Hz. Es ideal para laboratorios con gran carga de trabajo. También alcanza granulometrías finales en el rango micrométrico, normalmente hasta unos 5 μm .

El **MM 500 nano** está diseñado para obtener la máxima finura: a frecuencias de hasta 35 Hz alcanza tamaños nanométricos, de unos 100 nm en húmedo. Es especialmente adecuado para investigación en ciencia de materiales y nanotecnología.

El MM 500 control añade un control preciso de la temperatura entre -100 °C y +100 °C. A frecuencias de hasta 30 Hz alcanza finuras micrométricas y submicrométricas y permite, especialmente con el cryoPad, controlar con exactitud procesos termosensibles y mecanoquímicos.



*Molino mezclador MM 400 (izquierda)
y molino mezclador MM 500 nano (derecha).*

En definitiva, los modelos se diferencian principalmente por su especialización: aplicaciones estándar (MM 400), alto rendimiento (MM 500 vario), finura extrema (MM 500 nano) y máximo control del proceso (MM 500 control).

El molino mezclador CryoMill se ha desarrollado específicamente para la molienda criogénica. Su sistema integrado enfría continuamente el recipiente con nitrógeno líquido antes y durante la molienda. Así se fragiliza la muestra y se conservan los componentes volátiles. El molino regula el suministro de nitrógeno, evitando el contacto directo del usuario con el LN₂. El sistema Autofill dosifica exactamente la cantidad necesaria para mantener -196 °C, reduciendo el consumo y garantizando resultados reproducibles.

Pueden programarse distintos parámetros de trituración, lo que facilita las molien- das rutinarias. También pueden guardarse distintos parámetros de molienda para simplificar las aplicaciones rutinarias. Los LED de la pantalla indican el estado de funcionamiento, por ejemplo, refrigeración o molienda.

El principio de trituración es el mismo que en los demás molinos mezcladores. Con una frecuencia de 30 Hz, el CryoMill tritura de forma muy eficaz en pocos minutos. Dispone de un puesto para recipientes de 10, 25, 35 o 50 ml. También pueden utilizar- se adaptadores para hasta cuatro recipientes de 5 ml o seis tubos de reacción de 2 ml. El CryoMill puede funcionar sin refrigeración, lo que amplía su versatilidad.



Molino mezclador MM 500 control con cryoPad (izquierda) y CryoMill (derecha).





*Molino de bolas de alta energía
Emax*

El molino de bolas de alta energía Emax es un equipo de gran potencia para moliendas hasta el rango nanométrico, con un aporte de energía muy elevado.

Su exclusivo mecanismo combina las ventajas de distintos tipos de molino: impacto de alta frecuencia, propio de los molinos mezcladores; fricción intensa, característica de los molinos de discos vibratorios; y movimiento circular controlado de los recipientes, como en los molinos planetarios de bolas. El resultado es un rendimiento de trituración excepcional. Esta combinación se debe a la forma ovalada y al movimiento especial de los recipientes.

Los recipientes de 50 o 125 ml describen una trayectoria circular sin cambiar su orientación, generando una intensa fricción entre bolas, muestra y paredes, así como elevadas fuerzas de aceleración. En los recipientes ovalados, esto produce una mezcla más eficaz, mayor finura final y distribuciones granulométricas más estrechas que en los molinos de bolas convencionales.

La finura nanométrica se consigue mediante molienda en húmedo con bolas pequeñas, de 0,1 a 3 mm. La velocidad de hasta 2000 min^{-1} aumenta todavía más el aporte de energía. Al mismo tiempo, una refrigeración por agua eficaz evacua rápidamente el calor generado.

A diferencia de los molinos planetarios convencionales, que a menudo requieren pausas de hasta el 60 % del tiempo, el Emax puede funcionar de forma continua gracias a su refrigeración por agua.

Las aplicaciones de laboratorio actuales exigen máximo control, elevada reproducibilidad y total transparencia del proceso. La nueva generación de GrindControl responde plenamente a estas necesidades con una solución potente, inteligente e intuitiva.



*Sistema de medición
GrindControl*

GrindControl se utiliza en procesos con molinos de bolas y registra continuamente la presión y la temperatura dentro del recipiente. El sistema combina una unidad de medición y un software de análisis que permiten visualizar y evaluar ambas variables en tiempo real.

Esto hace más eficiente la preparación de muestras, permite supervisar de forma fiable materiales termosensibles y garantiza condiciones estables, incluso en aplicaciones exigentes, como las síntesis mecanoquímicas. GrindControl aporta transparencia al proceso de molienda y constituye una base para obtener resultados fiables y reproducibles.

El XRD-Mill McCrone se ha desarrollado específicamente para preparar muestras para difracción de rayos X (DRX).

Su eficacia se debe a un proceso exclusivo en el que 48 cuerpos de molienda cilíndricos de ágata, óxido de aluminio sinterizado o ZrO_2 trituran suavemente la muestra por fricción. Por ello, la molienda dura algo más, entre 30 y 60 minutos, pero la pérdida de material es insignificante y la distribución granulométrica muy estrecha. La estructura de la red cristalina se conserva en gran medida, requisito indispensable para obtener difractogramas de rayos X significativos.



XRD-Mill McCrone

El TM 300 está diseñado para un uso flexible en laboratorio y el desarrollo de métodos, y procesa volúmenes de hasta 9 l. Admite molienda en seco y en húmedo y puede utilizarse como molino de bolas o de barras. Su velocidad variable de hasta 80 min^{-1} , los ciclos programables y el funcionamiento por intervalos permiten controlar con precisión el aporte de energía y obtener resultados óptimos incluso con materiales sensibles. Su diseño modular y su manejo sencillo lo hacen idóneo para desarrollar aplicaciones, realizar procesos mecanoquímicos y ensayos de escalado.

El TM 500 está concebido para preparar grandes cantidades y procesa volúmenes de hasta 35 l. Admite material más grueso y alcanza una granulometría final fina incluso con muestras exigentes. Su construcción robusta permite moliendas prolongadas y cargas elevadas, y garantiza una mezcla y homogeneización intensas a velocidades de hasta 50 min^{-1} . Los intervalos programables, la inversión de giro para evitar adherencias y los sistemas de separación opcionales facilitan un trabajo eficiente y reproducible.

También se ofrece una versión foodGrade con tambor y bolas de acero 316L.



Molinos de tambor TM 300 (izquierda) y TM 500 (derecha).

3.7. Sistemas de ciclón

Una preparación eficiente y con pérdidas mínimas es esencial para obtener análisis reproducibles. Los separadores ciclónicos contribuyen de forma decisiva al mejorar la limpieza del laboratorio, la recuperación de la muestra y la fiabilidad del proceso. Un flujo de aire controlado extrae las partículas de la cámara de molienda, las introduce en una corriente giratoria y las recoge de forma fiable en el recipiente colector. Al mismo tiempo, reduce la carga térmica y protege los componentes mecánicos del polvo.

RETSCH ofrece soluciones de ciclón combinables con diferentes molinos y tamizadoras por chorro de aire. Además de molinos de rotor y de corte, pueden utilizarse con trituradoras de mandíbulas y molinos de discos. Es especialmente relevante integrar cadenas completas de procesamiento: una trituradora de mandíbulas y un molino de discos pueden conectarse para realizar una trituración cerrada, de dos etapas y con baja emisión de polvo, mientras un ciclón garantiza el transporte continuo de la muestra.

Un avance importante es el ciclón de alta eficiencia de separación, desarrollado para aplicaciones exigentes. Ofrece ventajas especialmente con tamices de abertura fina y materiales ligeros, voluminosos o fibrosos. Los ciclones estándar dan buenos resultados en aplicaciones de trituración gruesa; la versión de alto rendimiento puede aumentar la recuperación en más del 20% con muestras difíciles, especialmente madera, paja o plumas y aberturas de tamiz inferiores a 0,5 mm.

En sectores como el análisis alimentario y farmacéutico, la investigación medioambiental y de materiales y la minería, los ciclones son hoy mucho más que separadores de polvo: son componentes esenciales que mejoran la eficiencia, la seguridad y la calidad de los resultados.

*Unidad combinada de
trituradora de mandíbulas BB 250 y
molino de discos DM 200 con ciclón.*



4. Aplicaciones especiales

4.1. Disrupción celular y homogeneización de tejidos



La disrupción mecánica de células y la posterior homogeneización son pasos esenciales para preparar tejidos biológicos y liberar componentes celulares, como ADN, ARN, proteínas o metabolitos, para su análisis.

Métodos mecánicos como el bead beating utilizan cuerpos de molienda para romper las células y obtener al mismo tiempo una distribución uniforme del tamaño de partícula. Los molinos mezcladores MM 400 y MM 500 vario ofrecen gran reproducibilidad y eficiencia, incluso al procesar varias muestras en paralelo. Para estas aplicaciones se utilizan recipientes desechables en adaptadores especiales. La trituration suele realizarse con bolas de vidrio, que también pueden desecharse después de un solo uso.

Un buen punto de partida consiste en llenar al menos la mitad del recipiente de disrupción con bolas de vidrio y añadir el mismo volumen de suspensión celular. Según el tipo de célula, la disrupción tarda desde unos segundos hasta varios minutos. En el MM 500 control, un equipo externo de regulación de temperatura (chiller) permite mantener durante el proceso las muestras que contienen, por ejemplo, proteínas termosensibles por debajo de una temperatura crítica.



*Molino mezclador MM 400
con tubos de centrifuga*



*Adaptadores para tubos de
reacción desechables.*

Para tejidos blandos o compactos, como hígado, pulmón o muestras tumorales, una homogeneización intensa en recipientes desechables permite obtener rápidamente muestras representativas y aptas para el análisis. Como suelen emplearse bolas de acero mayores en lugar de pequeñas bolas de vidrio, los recipientes deben llenarse con solución tampón y, siempre que sea posible, utilizarse tiempos cortos y frecuencias bajas para reducir el riesgo de rotura. Opcionalmente se ofrecen recipientes de 2 ml más resistentes, de acero 316L.

4.2. Mecanoquímica



La mecanoquímica utiliza la energía mecánica de la molienda para desencadenar reacciones químicas y ofrece una alternativa sostenible a las vías de síntesis convencionales basadas en disolventes.

Su herramienta principal son los molinos de bolas, que mediante fuerzas de impacto y fricción permiten, aceleran o hacen viables reacciones, incluso cuando los reactivos presentan baja solubilidad o no reaccionan en disolución.

Los molinos planetarios de bolas, los molinos mezcladores y los molinos de alta energía, como el Emax, se diferencian por su principio de funcionamiento y permiten adaptar el aporte de energía a cada aplicación.

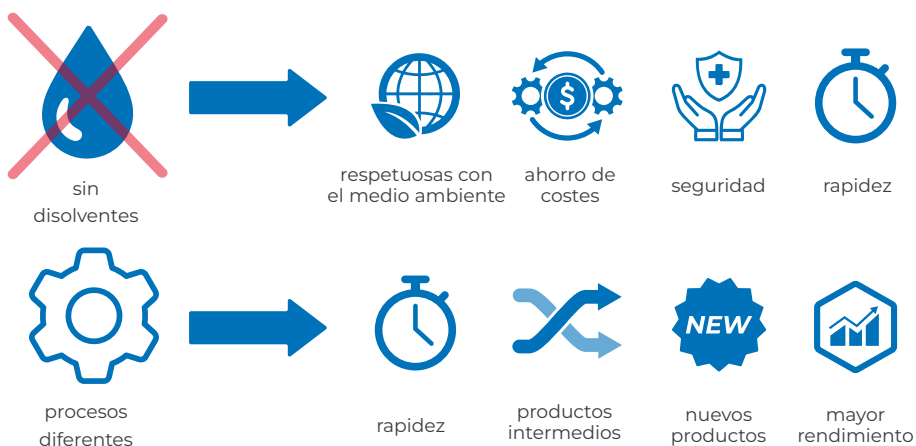
Los procesos mecanoquímicos son adecuados, entre otros fines, para síntesis orgánicas sin disolventes, estabilización de intermedios reactivos y reacciones con alta productividad espacio-tiempo. También son aplicaciones típicas la síntesis y el cribado de cocristales, el cribado de formas polimórficas de principios activos y el control de rutas de reacción variando la frecuencia de molienda y el tamaño de las bolas.

En ciencia de materiales, la energía mecanoquímica se utiliza para la aleación mecánica, la activación de sólidos y la obtención de nuevas fases cristalinas. Además, la mecanoquímica permite procesos innovadores de reciclaje y degradación, como la descomposición de polímeros especialmente estables o de sustancias químicas persistentes.



Otra aplicación es la producción escalable de materiales funcionales, por ejemplo, para usos farmacéuticos o catalíticos. El control de la temperatura, el aporte de energía y la atmósfera desempeña un papel decisivo y permite influir de forma específica en la velocidad de reacción, el rendimiento o la selectividad del producto.

Los sistemas avanzados de molienda permiten realizar procesos mecanoquímicos tanto refrigerados como calentados. Unas condiciones de molienda reproducibles proporcionan resultados sólidos y comparables. La combinación de eficiencia, sostenibilidad y flexibilidad convierte la mecanoquímica en una herramienta potente para investigación, desarrollo y diseño de procesos industriales.



Ventajas de las reacciones mecanoquímicas

INFORMACIÓN DE INTERÉS ›

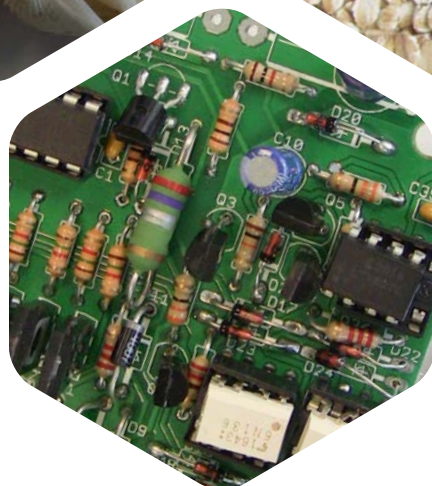


Descubra otras aplicaciones interesantes de nuestros equipos en las páginas de aplicaciones elaboradas por nuestros expertos.



5. Consideraciones finales

En muchas aplicaciones, la trituración es un paso importante de la preparación de muestras. Esta guía técnica ha presentado las distintas técnicas de trituración y ha explicado qué molinos son especialmente adecuados para cada tipo de muestra.



Las nuevas tareas de investigación y de tecnología de aplicaciones, junto con la creciente precisión del análisis instrumental, elevan las exigencias e impulsan el desarrollo continuo de equipos y herramientas de trituración.



Anexo: Consejos prácticos para la molienda con molinos de bolas

Cómo determinar el tamaño de bola adecuado

Al elegir el tamaño de las bolas deben considerarse la granulometría inicial y la finura final deseada. Reglas prácticas importantes:

- I Las bolas deben ser unas tres veces mayores que la partícula más grande de la muestra, por ejemplo, 10 mm $\rightarrow$ 30 mm, para aportar suficiente energía de trituración.
- I Para materiales muy duros pueden resultar adecuadas bolas mayores; si la muestra tiende a adherirse, conviene utilizar bolas más pequeñas.
- I La finura final alcanzable equivale aproximadamente a 1/1000 del diámetro de bola, por ejemplo, 30 mm $\rightarrow$ unos 30 μ m. Para obtener partículas menores, puede ser necesario realizar dos o más etapas sucesivas de trituración.

Importante: no deben mezclarse distintos tamaños de bola en una misma molienda, salvo en los molinos de tambor, ya que esto puede aumentar el desgaste y la contaminación. El recipiente y las bolas también deben ser del mismo material para evitar desgaste excesivo y contaminación por varios materiales.

Granulometría inicial

Bolas tres veces mayores que la partícula más grande de la muestra

Tamaño de partícula objetivo

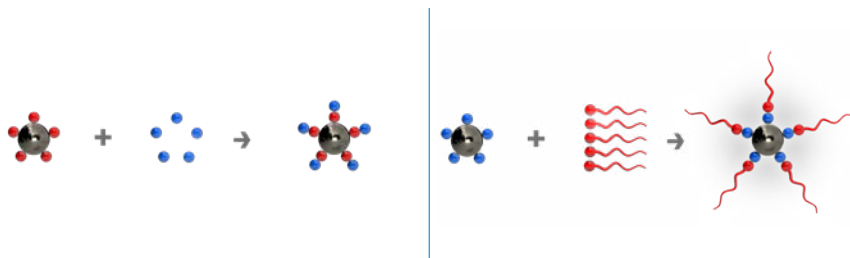
Bolas de 3 mm $\rightarrow$ partículas de hasta 3 μ m

...

Bolas de 0,1 mm $\rightarrow$ partículas de hasta 0,1 μ m

Para obtener partículas muy finas pueden necesitarse dos o más etapas de trituración y un cambio del tamaño de bola

Las finuras <10 μm suelen alcanzarse solo mediante molienda en húmedo, ya que las partículas finas tienden a aglomerarse por fuerzas electrostáticas. Los medios de dispersión, como agua, soluciones tampón o alcohol*, pueden evitarlo.



Neutralización de partículas cargadas mediante la adición de solución tampón (estabilización electrostática, izquierda) o de moléculas de cadena larga (estabilización estérica, derecha).

Recomendaciones para molienda en seco y en húmedo o coloidal

Molienda en seco: la regla general de llenado es un tercio de bolas, un tercio de muestra y un tercio vacío para que las bolas se muevan libremente. Suelen utilizarse bolas >3 mm. Cuanto mayores son las bolas, mayores son las fuerzas de impacto necesarias para triturar partículas grandes.

Molienda en húmedo o coloidal: para finuras <10 μm , y tras una trituración previa suficiente, se utilizan bolas de 0,1 a 3 mm. Deben ser unas diez veces mayores que la partícula máxima; por ejemplo, bolas de 3 mm para partículas de 300 μm . Se llena con bolas aproximadamente el 60% de la cámara para aumentar la superficie de fricción sobre las partículas muy finas. Se recomiendan materiales resistentes al desgaste, como el óxido de circonio, para reducir la abrasión. Aproximadamente el 30% del volumen se llena con muestra.

A continuación, se añade un medio de dispersión, como agua o alcohol*, hasta obtener una consistencia similar a la del aceite de motor. El medio no debe alterar las propiedades químicas de la muestra. Si esta tiende a espesarse, debe controlarse su viscosidad durante la molienda y añadir más dispersante cuando sea necesario.

* Respete las medidas de seguridad necesarias al manipular sustancias fácilmente inflamables.

Extracción de los recipientes de molienda

Después de la molienda, los recipientes de los molinos planetarios deben retirarse con mucho cuidado, ya que pueden estar muy calientes, en torno a 150 °C. Además, el calor generado puede elevar la presión interior. Por ello, se recomienda utilizar el dispositivo de cierre de seguridad opcional de los recipientes de la serie PM, que permite retirarlos de forma segura. Tras la trituración, los recipientes deben enfriarse durante unos minutos.

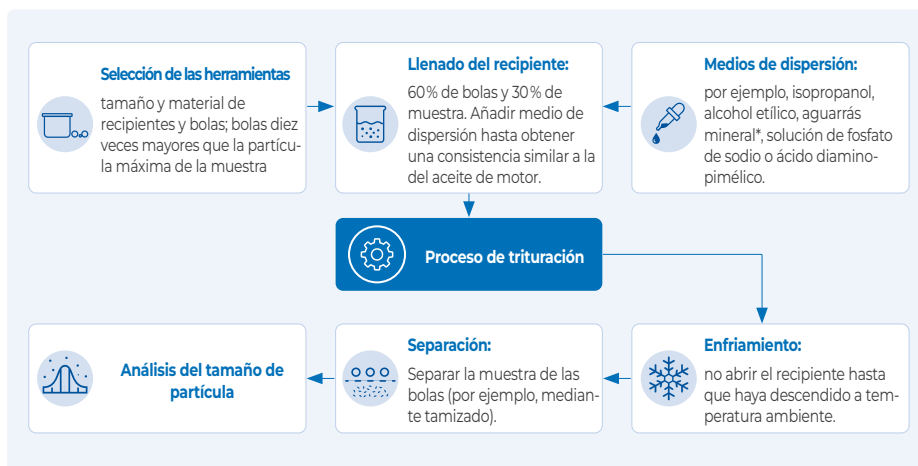
Los recipientes de los molinos mezcladores MM 500 nano y MM 500 control y del molino de alta energía Emax incorporan de serie un cierre de seguridad. Además, el eficaz sistema de refrigeración del Emax evita un calentamiento excesivo. Los recipientes de los MM 500 nano y MM 500 control, de los molinos planetarios y del Emax pueden equiparse con tapas de aireación opcionales para moler en atmósfera inerte.



Dispositivo de cierre de seguridad fijado y tapa de aireación de los recipientes PM (izquierda); recipiente MM 500 nano y MM 500 control con cierre de seguridad integrado (derecha).

Separación de las bolas después de una molienda en húmedo

Vierta el contenido del recipiente sobre un tamiz con bandeja colectora, con una abertura de malla entre un 20 % y un 50 % menor que el diámetro de las bolas, y fíjelo a una tamizadora vibratoria. Las vibraciones separan la muestra de las bolas. Las fuerzas capilares hacen que el material húmedo tienda a adherirse a estas. Enjuagar la muestra con líquido de dispersión facilita su recuperación.



Proceso y parámetros de molienda en húmedo.

*Respete las medidas de seguridad necesarias al manipular sustancias fácilmente inflamables



Anexo: Descripción de los materiales

A-1. Materiales metálicos	48
A-1.1. Aceros	48
A-1.2. Hierro fundido y fundición maleable	54
A-1.3. Ni-Hard 4	55
A-1.4. Titanio	56
A-2. Materiales cerámicos	58
A-2.1. Carburo de tungsteno (metal duro)	58
A-2.2. Óxido de circonio	60
A-2.3. Óxido de aluminio sinterizado	62
A-2.4. Porcelana dura	64
A-3. Otros materiales	66
A-3.1. Ágata (piedra natural)	66
A-3.2. Vidrio	68
A-3.3. PTFE (plástico)	70
A-3.4. Polipropileno (plástico)	71
A-3.5. Policarbonato (plástico)	72
A-3.6. PMMA (plástico)	73
A-4. Explicaciones	74
A-4.1. Dureza	74
A-4.2. Composición química	75
A-4.3. Tabla comparativa de durezas	76

Los datos de composición química son valores redondeados. Solo se indican los componentes principales o característicos de cada material. Por ello, la suma de los porcentajes puede diferir del 100%. Los análisis más detallados, incluidos los componentes minoritarios, figuran en el PDF „Material Analyses of Equipment & Accessories“ en www.retsche.com.



A-1. Materiales metálicos

A-1.1. Aceros

Definición

Los aceros son materiales a base de hierro cuyo contenido de carbono suele ser inferior al 2%. Desde el punto de vista químico, el acero es una aleación de hierro y carburo de hierro.

Al variar el contenido de elementos de aleación, como cromo o manganeso, y su distribución, pueden ajustarse propiedades como dureza, elasticidad, ductilidad y resistencia a la tracción. Existen distintos procesos de fabricación del acero que no se describen aquí en detalle.

En los equipos y accesorios RETSCH se utilizan los siguientes aceros:

- | Acero inoxidable
- | Acero inoxidable AISI 316L / 1.4404
- | Acero endurecido
- | Acero para trituración sin metales pesados, por ejemplo, acero 1.1750, St 1203
- | Acero al manganeso, obtenido por fundición de precisión

Dureza

48 – 52 HRC
(Rockwell)

Densidad

7,8 g/cm³

Composición

Fe: 62 – 84.5 %
Cr: 13 – 19.5 %
Ni: <14 %

Acero inoxidable

Se denomina acero inoxidable al acero resistente a la corrosión. Esta resistencia se debe a una película protectora de óxido extremadamente fina e invisible, denominada capa pasiva. Se forma con contenidos de cromo >12%. La resistencia a la corrosión aumenta con el contenido de cromo. Sin embargo, por encima del 20% se pierde templabilidad y, con ella, la resistencia del acero al desgaste.

El esfuerzo mecánico continuo, como el que soportan las herramientas de molienda, puede destruir la capa pasiva y aumentar la rugosidad superficial. Además de contaminación cruzada, pueden aparecer zonas de corrosión. Su causa es el desgaste y no una calidad insuficiente del material.

Para eliminar indicios de corrosión, suciedad o depósitos de óxido ajeno a la herramienta pueden utilizarse limpiadores comerciales para metales y un cepillo. Tras la limpieza en húmedo, se recomienda frotar las piezas con isopropanol o acetona y secarlas bien.

Acero inoxidable AISI 316L / 1.4404

El acero inoxidable 316L es un acero austenítico de bajo contenido de carbono, con elevada resistencia a la corrosión y excelente resistencia mecánica. Resiste mejor la corrosión que el acero inoxidable habitual, aunque suele ser algo más blando. Se utiliza preferentemente en aplicaciones alimentarias y farmacéuticas.

Dureza

185 – 215 HBW

Densidad

7,9 g/cm³

Composición

Fe: 59,6 – 64,3 %

Acero endurecido

Al igual que el inoxidable, el acero endurecido pertenece a los aceros al cromo, aunque tiene un contenido menor, del 12%. Por ello, destaca por su mayor dureza y no por su resistencia a la corrosión.

Dureza

58 – 63 HRC
(Rockwell)

Densidad

7,85 g/cm³

Composición

Fe: 84 – 85 %
Cr: 12 %

Härte

bis zu 62 HRC
(Rockwell)

Densidad

7,85 g/cm³

Composición

Fe: 98 – 99 %

Acero para trituración sin metales pesados ***Por ejemplo, acero 1.1750, St 1203.***

Estos aceros no contienen cromo ni níquel y pueden utilizarse para preparar muestras destinadas al análisis de metales pesados, siempre que una posible contaminación por hierro no interfiera.

Su contenido de carbono permite alcanzar durezas de hasta 62 HRC. Debido a su elevada proporción de hierro, del 97-99%, no resisten la corrosión y requieren cuidados adecuados y almacenamiento en seco. Después de procesar materiales húmedos o mojados, deben limpiarse y secarse cuidadosamente para evitar zonas de corrosión. Las herramientas que no se utilizan durante periodos prolongados se protegen con una fina película de aceite o grasa.

Dureza

bis zu 55 HRC
(Rockwell)

Densidad

7,2 g/cm³

Composición

Fe: 85 %
Mn: 13 %

Acero al manganeso obtenido por fundición de precisión

También se denomina acero Hadfield, en honor a su inventor. Su contenido de manganeso es del 12-14 % y el de carbono del 1-1,2 %.

Tras el enfriamiento brusco del metal fundido a 1100 °C, el acero aún presenta una estructura muy dúctil y deformable. Solo al someterlo a impactos se transforma parte de la estructura y se alcanzan durezas superiores a 600 HV, aproximadamente 55 HRC. Este proceso se denomina endurecimiento por deformación en frío; por ello, el acero al manganeso se considera un material endurecible en frío.

Aplicaciones de las herramientas de molienda de acero

Acero inoxidable y acero inoxidable AISI 316L / 1.4404

El acero inoxidable se utiliza con frecuencia en mineralogía y metalurgia. Otras aplicaciones son la molienda fina de carbón, coque y escorias y la trituración de materias primas y productos intermedios para fabricar cemento y cal.

Como el cromo y el níquel son componentes principales de la aleación, no es adecuado para preparar materiales destinados a determinar metales pesados.

Las herramientas de acero inoxidable se desgastan más que las de otros aceros, especialmente por fricción con materiales duros y abrasivos.

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Mineralogía
- | Materiales de construcción
- | Plásticos
- | textiles
- | Combustibles secundarios
- etc.

Ejemplos de materiales:

- | Minerales
- | Menas
- | Cemento
- | Polímeros
- | Placas de circuito impreso
- | Papel
- | Piensos

Acero endurecido

Las herramientas de acero endurecido se utilizan principalmente cuando el inoxidable se desgastaría demasiado deprisa, por ejemplo, en cuchillas de molinos de corte o con muestras duras y abrasivas. También ofrecen ventajas en molinos cuya acción se basa principalmente en la fricción.

Acero para trituración sin metales pesados

Por ejemplo, acero 1.1750, St 1203.

Se emplea sobre todo en molinos de corte, trituradoras de mandíbulas y molinos de impacto de palas, cuyos mecanismos de acción no permiten utilizar herramientas cerámicas.

El acero sin metales pesados puede utilizarse para preparar muestras destinadas a su análisis, siempre que la contaminación por hierro no interfiera. Algunos ejemplos son la trituración de distintos combustibles secundarios en molinos de corte y la de suelos en trituradoras de mandíbulas y molinos de impacto de palas.

Acero al manganeso obtenido por fundición de precisión

Se utiliza para piezas resistentes al desgaste sometidas a presión. Por ello se emplea en trituradoras de mandíbulas.

Ventajas

- Amplias posibilidades de uso gracias a aceros con distintas propiedades químicas y mecánicas
- Aporte de energía muy alto
- Precio económico

Inconvenientes

- Resistencia al desgaste a veces limitada; posible contaminación con Fe y otros componentes

Equipos con juegos de molienda de acero

Acero inoxidable

- Trituradoras de mandíbulas BB 50, BB 200 y BB 300
- Molinos de rotor ZM 300, SR 300 y SK 300
- Molinos de corte y de cuchillas GM 200, GM 300, SM 50, SM 100, SM 200 y SM 300
- Molino de mortero RM 200
- Molinos planetarios de bolas PM 100, PM 200, PM 300 y PM 400
- Molino de bolas de alta energía Emax
- Molinos mezcladores MM 400, MM 500 nano, MM 500 vario, MM 500 control y CryoMill

Acero inoxidable AISI 316L

- Trituradora de mandíbulas BB 250
- Molino de corte SM 300
- Molinos de tambor TM 300 y TM 500

Acero endurecido

- Molino de impacto de palas SK 300, placas de impacto y pieza molturadora; molino de martillos HM 200
- Molinos de corte SM 50, SM 100, SM 200 y SM 300, cuchillas del rotor de corte paralelo
- Molino de mortero RM 200
- Molinos de discos RS 200, RS 300 y DM 200
- Molinos planetarios de bolas PM 100, PM 200, PM 300 y PM 400
- Molinos mezcladores MM 400, MM 500 nano, MM 500 vario, MM 500 control y CryoMill

Acero para trituración sin metales pesados**Por ejemplo, acero 1.1750, St 1203.**

- Trituradoras de mandíbulas BB 50, BB 200, BB 250, BB 300 y BB 400
- Molino de impacto de palas SK 300
- Molinos de corte SM 50, SM 100, SM 200 y SM 300

Acero al manganeso obtenido por fundición de precisión

- Trituradoras de mandíbulas BB 50, BB 200, BB 250, BB 300, BB 400, BB 500 y BB 600
- Molino de discos DM 200

A-1.2. Hierro fundido y fundición maleable

Resistencia a la tracción

Hierro fundido
200 – 300 N/mm²
Fundición maleable
aprox. 370 N/mm²

Densidad

Hierro fundido
8,25 g/cm³
Fundición maleable
7,2 g/cm³

Composición

Hierro fundido
Fe: 94 %
C: 4 %
Fundición maleable
Fe: 95,5 %
C: 3 %

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Mineralogía
- | Materiales de construcción
- | Agricultura

Ejemplos de materiales:

- | Minerales
- | Menas
- | Cemento
- | Pisos

Definición

El hierro fundido es un material a base de hierro con contenidos de carbono >2% y de silicio >1,5%. En la fundición gris o laminar, el carbono aparece en forma de finas láminas de grafito distribuidas irregularmente. Su nombre alude al proceso de fabricación: verter metal fundido en moldes.

A diferencia del hierro fundido, la fundición maleable se somete a recocido después de solidificar, durante varios días a unos 1000 °C en una atmósfera oxidante.

Aplicaciones de las herramientas de estos materiales

El hierro fundido es una alternativa económica al acero, pero su escasa dureza limita su uso. La fundición maleable es más dúctil que la gris y tolera pequeñas deformaciones plásticas sin romperse. Por ello, se utiliza sobre todo en piezas sometidas a impactos, como el rodete de palas del SK 300. Las placas de impacto fijadas a este, que soportan los mayores esfuerzos y desgaste, se fabrican en acero.

Ventajas

- Resistencia a impactos
- Aporte de energía muy alto
- Precio económico

Inconvenientes

- Resistencia al desgaste a veces limitada, con posible contaminación por Fe y otros componentes
- Menor dureza que el acero

Equipos disponibles:

- Molino de impacto de palas SK 300, pieza molturadora y rodete de palas

A-1.3. Ni-Hard 4

Definición

Ni-Hard 4 es una fundición blanca de alta aleación con contenidos elevados de níquel y cromo. A diferencia de la fundición gris convencional, el carbono se encuentra principalmente combinado en forma de carburos, como cementita, y no como grafito libre. Esto produce una estructura muy dura y resistente al desgaste.

Comparado con el hierro fundido y la fundición maleable, Ni-Hard 4 presenta una dureza y resistencia al desgaste mucho mayores, pero también es más frágil y menos dúctil. La estructura gráfica de la fundición gris aporta buenas propiedades de amortiguación y la fundición maleable cierta tenacidad; Ni-Hard 4 está diseñado para materiales muy duros y abrasivos, en los que los impactos tienen una importancia secundaria.

Aplicaciones de las herramientas de Ni-Hard 4

Se utiliza en piezas de desgaste sometidas a grandes esfuerzos, como mandíbulas, revestimientos y chapas antidesgaste, cuando se requiere la máxima vida útil.

Ventajas

- Tipo de acero extremadamente resistente a la abrasión
- Alternativa económica al carburo de tungsteno.

Inconvenientes

- Contiene metales pesados, entre ellos Ni y Cr
- Es frágil

Equipos disponibles:

- Trituradoras de mandíbulas BB 200, BB 250, BB 400, BB 500 y BB 600 (mandíbulas y chapas antidesgaste)
- BB 500 (chapas antidesgaste)

Dureza

Ni-Hard 4:
550 – 700 HBW

Densidad

Ni-Hard 4:
7,7 g/cm³

Composición

Ni-Hard 4:
Fe: 80 – 85 %
Ni: 5 – 6,5 %
C: 8 – 9 %

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Mineralogía
- | Materiales de construcción
- | Metalurgia

Ejemplos de materiales:

- | Minerales
- | Menas
- | Escoria
- | Cemento
- | Aleaciones

A-1.4. Titanio

Dureza

6 Mohs

Densidad

4,5 g/cm³

Composición

Ti: 99,5%

Definición

El titanio (Ti) es un elemento químico de número atómico 22. Perteneció a los metales de transición y combina una densidad relativamente baja con elevada resistencia. La formación de una capa protectora de óxido le confiere resistencia a la corrosión. Como el titanio de alta pureza es dúctil, pueden añadirse pequeñas cantidades de otros elementos, como oxígeno y nitrógeno, para mejorar sus propiedades mecánicas mediante fragilización.

El titanio es relativamente abundante en la corteza terrestre, aunque suele encontrarse en bajas concentraciones y en forma de óxidos. Se obtiene principalmente de los minerales rutilo (TiO₂) e ilmenita (FeTiO₃).

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Farmacia
- | Alimentos
- | Análisis de metales pesados

Ejemplos de materiales:

- | Verduras
- | Frutas
- | Embutidos
- | Medicamentos
- | Cables etc.

Aplicaciones de las herramientas de titanio

Para la molienda sin metales pesados, solo se ofrecen herramientas de titanio para el molino ultracentrífugo ZM 300 y los molinos de cuchillas GM 200 y GM 300; en el GM 300, únicamente como recubrimiento de titanio-niobio. Los materiales cerámicos no son adecuados para estos molinos porque podrían romperse con facilidad.

Ventajas

- Sin metales pesados

Inconvenientes

- Caro
- Menor dureza que el acero

Equipos disponibles:

- Molino ultracentrífugo ZM 300 (rotor, tamices y recipiente colector; solo recubrimiento de titanio-niobio)
- Molinos de cuchillas GM 200 y GM 300 (en el GM 300, solo recubrimiento de titanio-niobio)



A-2. Materiales cerámicos

A-2.1. Carburo de tungsteno (metal duro)

Dureza

aprox. 1250 HV
(Vickers)

Densidad

14,8 g/cm³

Composición

WC: 90 – 94 %
Co: 6 – 10 %

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Minería y metalurgia
- | Química
- | Mineralogía

Ejemplos de materiales:

- | Menas
- | Ferroaleaciones
- | Óxidos metálicos
- | Clínker de cemento
- | Carbón activado
- | Minerales

Definición

El carburo de tungsteno pertenece a los metales duros. El carburo puro, descrito como una solución sólida de tungsteno y carbono, es muy frágil. Por ello se añade entre un 6% y un 10% de cobalto para aumentar su tenacidad y minimizar el desgaste. La composición del metal duro depende de la aplicación y de las exigencias técnicas.

Se fabrica mediante sinterización de tungsteno y carbono. Al calentarlos a alta presión, el carbono se incorpora a la estructura cristalina del tungsteno. El carburo resultante aumenta el punto de fusión y la dureza del metal.

Destaca por su elevada dureza, incluso a temperaturas de trabajo altas, y su resistencia al desgaste. Según su composición, puede presentar una dureza comparable a la del diamante. Por ello se utiliza ampliamente, por ejemplo, en herramientas de mecanizado y de conformado sin arranque de viruta. También se emplea en herramientas sometidas a desgaste por fricción, incluidas diversas herramientas de molienda RETSCH.

Aplicaciones de las herramientas de carburo de tungsteno

Su resistencia al desgaste y dureza son altas, pero su fragilidad lo hace sensible a golpes e impactos. Los cambios bruscos de temperatura, como los de la molienda criogénica, también pueden romper las piezas. Por ello no todos nuestros equipos de trituración, por ejemplo los molinos de impacto de rotor, se ofrecen con herramientas de metal duro.

La resistencia a compresión y flexión, la tenacidad, la elevada densidad y la dureza dependen principalmente de la composición del metal duro. Por ello, el contenido de cobalto varía entre nuestras herramientas, pero siempre se adapta de forma óptima al mecanismo de acción de cada equipo.

Ventajas

- Elevada resistencia al desgaste y dureza en caliente
- Excelentes resultados gracias a la alta densidad, especialmente con cuerpos de molienda de movimiento libre en molinos de bolas
- Alto aporte de energía

Inconvenientes

- No puede utilizarse si la posible contaminación por desgaste de tungsteno o cobalto metálico interfiere en el análisis posterior
- Las muestras más blandas pueden adherirse durante la molienda
- Calentamiento de la muestra

Equipos con juegos de molienda de carburo de tungsteno

- Trituradoras de mandíbulas BB 50, BB 200, BB 250, BB 300, BB 400, BB 500 y BB 600
- Molinos de corte SM 50, SM 100, SM 200 y SM 300: placas de corte reversibles para rotores de tres y seis discos
- Molinos de discos RS 200 y DM 200
- Molino de mortero RM 200
- Molinos planetarios de bolas PM 100, PM 200, PM 300 y PM 400
- Molino de bolas de alta energía Emax
- Molinos mezcladores MM 400, MM 500 nano, MM 500 vario y MM 500 control

Dureza

*aprox. 7,5 Mohs
(aprox. 1200 HV)*

Densidad

5,9 g/cm³

Composición

*ZrO₂: 94,5%
Y₂O₃: 5%*

A-2.2. Óxido de circonio

Definición

La materia prima principal para fabricar cerámica de óxido de circonio (ZrO₂) es el circón (ZrSiO₄). Industrialmente se obtiene ZrO₂ fundiéndolo con coque y cal, mediante reducción del SiO₄. El polvo resultante se mezcla con aditivos y se conforma por prensado en seco. La pieza se sinteriza y después se rectifica y pule según su aplicación. La sinterización puede realizarse a presión atmosférica o elevada. Es en esta etapa cuando las piezas adquieren sus propiedades definitivas.

El dióxido de circonio presenta distintas modificaciones cristalinas según la temperatura, cada una con un volumen diferente. La adición de óxido de itrio impide que, al enfriarse tras la sinterización, se transforme en la modificación más estable a temperatura ambiente: permanece en forma parcialmente estabilizada. Si aparece una grieta, el óxido de circonio de esa zona se transforma espontáneamente en la modificación más estable, aumentando su volumen. Este efecto vuelve a cerrar inmediatamente la grieta.

Tradicionalmente se utiliza como cerámica refractaria. Sus propiedades y buena biocompatibilidad han ampliado su uso en prótesis y restauraciones dentales. El óxido de circonio parcialmente estabilizado también tiene numerosas aplicaciones técnicas. Su gran resistencia a los efectos térmicos, químicos y mecánicos lo hace muy adecuado para herramientas de molienda.

Aplicaciones de las herramientas de óxido de circonio

El óxido de circonio presenta gran resistencia al desgaste mecánico y una densidad elevada para una cerámica. Está libre de metales pesados, por lo que resulta excelente para preparar muestras destinadas a su análisis. También ofrece ventajas decisivas en medicina y biología, al preparar tejidos vegetales y animales, y en medicina humana, donde cualquier material desprendido por desgaste podría afectar a la salud. Como máximo se produce una contaminación que no interfiere en estos campos de aplicación.

Se emplea en trituradoras de mandíbulas RETSCH y en molinos de bolas, de mortero y de discos. Su elevada densidad permite un alto aporte de energía. No obstante, al ser una cerámica frágil, deben respetarse las recomendaciones de cantidad de muestra y granulometría inicial máxima para evitar daños en las herramientas. También se utiliza en la BB 50 para triturar sin metales pesados. Su fragilidad y baja resistencia al impacto impiden usarlo en trituradoras de mandíbulas mayores o en molinos de rotor.

Ventajas

- Sin metales pesados
- Alta densidad
- Muy buena resistencia al desgaste

Inconvenientes

- Más caro que el acero
- Uso limitado con golpes e impactos

Equipos con juegos de molienda de óxido de circonio

- Trituradora de mandíbulas BB 50
- Molinos de discos RS 200 y DM 200
- Molino de mortero RM 200
- Molinos planetarios de bolas PM 100, PM 200, PM 300 y PM 400
- Molino de bolas de alta energía Emax
- XRD-Mill McCrone
- Molinos mezcladores MM 400, CryoMill, MM 500 nano, MM 500 vario y MM 500 control

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Biotecnología, medicina
- | Análisis de metales pesados
- | Análisis de trazas

Ejemplos de materiales:

- | Suelos
- | Lodos de depuradora
- | Compost
- | Plantas
- | Huesos
- | Dientes
- | Tejidos

Dureza

*aprox. 9 – 9,5 Mohs
1750 HV (Vickers)*

Densidad

3,9 g/cm³

Composición

Al₂O₃: 99,7%

Campos de aplicación:

p. ej.

- | *Biología*
- | *Microbiología*
- | *Tecnología cerámica*
- | *Principios activos homeopáticos*

Ejemplos de materiales:

- | *Cerámica*
- | *Suelos*
- | *Hierba*
- | *Coníferas*
- | *Compost*

A-2.3. Óxido de aluminio sinterizado

Definición

El corindón es óxido de aluminio puro (Al₂O₃). Es relativamente frecuente en la naturaleza y se considera el segundo mineral más duro después del diamante. A este grupo pertenecen, por ejemplo, el rubí rojo y el zafiro azul.

Los corindones sintéticos comenzaron a utilizarse hacia 1900 en la industria refractaria. Su mayor homogeneidad química y física suele hacerlos preferibles a los naturales para el procesamiento industrial. Para fabricar óxido de aluminio sinterizado, el polvo de alúmina prensado se calienta a 1300 °C. Este polvo es un producto intermedio de la obtención de aluminio a partir de bauxita. Su elevada dureza y pureza, junto con su precio económico, favorecen su uso en herramientas de molienda. Debido a su densidad relativamente baja y al reducido aporte de energía resultante, la carga térmica sobre la muestra es pequeña, lo que suele ser ventajoso para materiales sensibles, como plantas.

Aplicaciones de las herramientas de óxido de aluminio sinterizado**Cerámica**

Como el material desprendido por desgaste es Al₂O₃ de gran pureza y no interfiere en estas aplicaciones, su uso principal es preparar pastas y esmaltes para cerámica doméstica, sanitaria y de uso general. También se utiliza para preparar cerámicas refractarias.

Sustancias homeopáticas

Por su mayor resistencia al desgaste, estos juegos sustituyen en ocasiones a los de porcelana dura tradicionalmente utilizados en molinos de mortero para preparar principios activos homeopáticos.

Análisis de metales pesados

Las normas correspondientes para analizar metales pesados en suelos describen molinos de bolas con juegos de óxido de circonio. Por razones económicas también se utilizan juegos de óxido de aluminio sinterizado, ampliamente aceptados desde el punto de vista analítico. El Al_2O_3 tiene una dureza de 9-9,5 Mohs, pero resiste menos el desgaste abrasivo que el óxido de circonio. Por ello no se recomienda usarlo en molinos planetarios a velocidades elevadas.

Ventajas

- Sin metales pesados
- Económico
- Buena resistencia al desgaste
- Carga térmica mínima y ausencia de adherencias de la muestra

Inconvenientes

- Sensible a golpes e impactos
- Sensible al choque térmico
- Bajo aporte de energía

Equipos con juegos de molienda de óxido de aluminio sinterizado

- Molino de mortero RM 200
- Molinos planetarios de bolas PM 100, PM 200, PM 300 y PM 400
- XRD-Mill McCrone

A-2.4. Porcelana dura

Dureza

aprox. 6 – 7 Mohs
(aprox. 1200 HV)

Densidad

2,4 g/cm³

Composición

SiO₂: 68,5 %
Al₂O₃: 26 %

Campos

de aplicación:

p. ej.

- | Farmacia
- | Medicina
- | Biología

Ejemplos

de materiales:

- | Plantas
- | Productos farmacéuticos
- | Semillas oleaginosas
- | Pastas

Definición

La porcelana dura es una cerámica de silicatos fabricada con caolín, arcilla exenta de hierro, feldespato potásico y cuarzo. Contiene un 25-70 % de Al₂O₃ y un 30-75 % de SiO₂. Se cuece a unos 1400 °C.

A mediados del siglo XIX comenzó a utilizarse como cerámica técnica, especialmente en la industria eléctrica, donde sigue siendo un material importante.

Aplicaciones de las herramientas de porcelana dura

Se utilizan en homeopatía y medicina para triturar en mortero. Por ello, RETSCH la emplea exclusivamente en juegos del molino de mortero RM 200.

Ventajas

- Precio económico
- Sin metales pesados

Inconvenientes

- Baja resistencia al desgaste con materiales abrasivos
→ superficie rugosa

Equipos con juegos de porcelana dura:

- Molino de mortero RM 200



A-3. Otros materiales

A-3.1. Ágata (piedra natural)

Dureza

6,5 – 7 Mohs
(aprox. 1000 HV)

Densidad

2,65 g/cm³

Composición

SiO₂: 99,9%

Definición

El ágata es un mineral de cuarzo, dióxido de silicio (SiO₂), y pertenece a las llamadas piedras semipreciosas. Se forma en cavidades de rocas volcánicas por precipitación de SiO₂ a partir de soluciones de ácido silícico. Su nombre se atribuye al primer lugar donde se encontró, supuestamente junto al río Achates, en Sicilia. Actualmente hay yacimientos, por ejemplo, en Bohemia, Brasil, Sicilia y Uruguay.

A principios del siglo XX comenzó a utilizarse como material técnico. Farmacéuticos y homeópatas reconocieron pronto las ventajas de los morteros manuales de ágata para triturar polvos y pastas, gracias a su composición de SiO₂ puro y su resistencia al desgaste. Frente a los morteros de latón y porcelana habituales hasta entonces, ofrecían un desgaste que no interfería en la preparación, superficies lisas fáciles de limpiar y menor contaminación cruzada.

Con la mejora de las técnicas de mecanizado mediante herramientas de diamante, distintos tipos de molinos pudieron equiparse con juegos de ágata. Como consecuencia, la porcelana ha ido perdiendo importancia en la preparación mecánica.

Aplicaciones de las herramientas de ágata

Como se ha indicado, el ágata se compone principalmente de dióxido de silicio. Por ello, las herramientas de este material son adecuadas para preparar muestras sin interferir en el análisis, tal como requieren los sectores de alimentación, biología, medicina y farmacia. También son indispensables para prepa-

rar muestras destinadas al análisis de metales pesados, triturar pigmentos cuyo color se alteraría por desgaste metálico y procesar componentes pastosos y pomadas farmacéuticas.

El ágata resiste la presión y la fricción, pero es sensible a golpes e impactos. Se utiliza principalmente en molinos de mortero, aunque también en molinos de bolas y de discos vibratorios. Su densidad relativamente baja le permite soportar el impacto en molinos de bolas. En los de discos vibratorios, un sensor limita la velocidad a 700 min^{-1} para evitar que la fricción y los impactos rompan prematuramente los cuerpos de molienda.

El ágata es un producto natural y su calidad depende de su formación. Antes de fabricar una herramienta se comprueba la ausencia de cavidades e inclusiones, pero no puede garantizarse una estructura uniforme y homogénea como en materiales sintéticos. Un esfuerzo mecánico y térmico elevado y continuo puede causar fatiga prematura y rotura del juego. Por ello, especialmente en molinos planetarios, debe utilizarse como máximo dos tercios de la velocidad máxima.

También deben evitarse los choques térmicos de la molienda criogénica con nitrógeno líquido en molinos de mortero y mezcladores, ya que producen grietas por tensiones en el ágata.

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Farmacia
- | Alimentos
- | Medicina
- | Biología

Ejemplos de materiales:

- | Plantas
- | Especies
- | Cacao
- | Chocolate
- | Medicamentos
- | Pastas
- | Semillas oleaginosas
- | Tejidos biológicos y esporas

Ventajas

- Sin metales pesados
- Producto natural tradicional, de gran aceptación
- Carga térmica mínima y ausencia de adherencias de la muestra

Inconvenientes

- Sensible a golpes e impactos
- Posibles heterogeneidades
- Sensible al choque térmico
- Aporte de energía muy bajo

Equipos con juegos de molienda de ágata

- Molinos planetarios de bolas PM 100, PM 200, PM 300 y PM 400
- Molino mezclador MM 400
- Molino de discos vibratorios RS 200
- Molino de mortero RM 200 y morteros manuales
- XRD-Mill McCrone

A-3.2. Vidrio

Dureza

aprox. 6 Mohs

Densidad

2,2 g/cm³

Composición

*SiO₂: 80 %
B₂O₃: 13 %*

Definición

El vidrio es una sustancia amorfa, es decir, no cristalina. Suele fabricarse a partir de una masa fundida que se enfría con suficiente rapidez para impedir la formación de cristales. Se compone principalmente de SiO₂. Sus propiedades pueden modificarse mediante distintos aditivos.

En laboratorio suele utilizarse vidrio de borosilicato por su buena resistencia química y estabilidad térmica. La resistencia química depende principalmente del contenido de óxido de boro, de alrededor del 13%. También se conoce por las denominaciones Jenaer Glas y Duran.

Aplicaciones de las herramientas de vidrio

Una aplicación del vidrio son las microesferas para disrupción celular en el molino mezclador MM 400. Como son relativamente económicas, pueden considerarse desechables junto con los tubos de reacción de polipropileno y eliminarse después de retirar la muestra. Así se evita una limpieza laboriosa de las herramientas.

Ventajas

- Esterilizable y autoclavable
- Resistencia química relativamente alta
- Transparente

Inconvenientes

- Bajo aporte de energía

Herramientas de vidrio disponibles:

- Microesferas de molienda para molinos de bolas

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Alimentos
- | Farmacia
- | Medicina
- | Biología

Ejemplos de materiales:

- | Verduras
- | Frutas
- | Pescado
- | Productos farmacéuticos
- | Tejidos biológicos
- | Disrupción celular

Dureza

D 56 (Shore)

Densidad2,1 g/cm³**Composición**

PTFE: 100 %

A-3.3. PTFE (plástico)

Definición

El PTFE o *Teflón* es un plástico termoplástico, un polímero. PTFE significa politetrafluoroetileno, un compuesto de flúor y carbono. Teflon es un nombre comercial de la empresa DuPont.

Es un material prácticamente inerte, resistente a numerosas sustancias químicas, como ácidos, bases, alcoholes y fracciones de petróleo ligeras. Por ello, los recubrimientos de PTFE se utilizan para proteger contra la corrosión de sustancias agresivas. También se emplea como recubrimiento antiadherente, por ejemplo en ollas y sartenes, en textiles funcionales como Gore-Tex, como material de sellado y en instalaciones químicas y tecnología médica, incluidos implantes.

Se desarrolló en la década de 1930 durante la búsqueda de un nuevo refrigerante para frigoríficos.

Aplicaciones de las herramientas de PTFE

Campos de aplicación:

p. ej.

- | Farmacia
- | Medicina
- | Biología

Ejemplos de materiales:

- | Plantas
- | Medicamentos
- | Tejidos biológicos
- | Disrupción celular

Su dureza es menor que la de otros materiales, por lo que solo resulta adecuado para muestras blandas, como tejidos celulares. Para aumentar el aporte de energía, las bolas de PTFE incorporan un núcleo de hierro. Sus recipientes se utilizan mucho para muestras biológicas y médicas: el material es inerte y su carácter antiadherente facilita la limpieza. Como el PTFE es térmicamente estable y los recipientes no llevan una envoltura de hierro, también son adecuados para molienda criogénica.

Ventajas

- Inerte y resistente a numerosas sustancias químicas, incluso agresivas
- Estable entre -200°C y $+260^{\circ}\text{C}$, adecuado para molienda criogénica
- Sin metales pesados
- Antiadherente

Inconvenientes

- Baja dureza
- Bajo aporte de energía
- Baja resistencia al desgaste

Equipos con juegos de PTFE:

- Molinos mezcladores MM 400, MM 500 vario y CryoMill

A-3.4. Polipropileno (plástico)**Definición**

El polipropileno (PP) es un termoplástico obtenido por polimerización del propeno, un hidrocarburo.

Se utiliza con frecuencia en laboratorio. Resiste casi todos los disolventes orgánicos y las grasas, así como la mayoría de los ácidos y las bases.

Aplicaciones de las herramientas de polipropileno

Las distintas tapas del molino de cuchillas GRINDOMIX GM 200 son de polipropileno. Es adecuado para productos blandos, blandos y tenaces, y también para productos con agua o aceite.

También son de polipropileno los tubos de reacción para disrupción celular. Se ofrecen en volúmenes de 0,2, 1,5 y 2 ml y permiten procesar cantidades mínimas de muestra. Los tubos están destinados a un solo uso, por lo que no necesitan limpieza.

Densidad

$0,89 - 0,92 \text{ g/cm}^3$

Composición

PP: 100 %

Campos de aplicación:

p. ej.
 | Alimentos
 | Biología
 | Medicina

Ejemplos de materiales:

| Frutas
 | Verduras
 | Queso
 | Embutidos
 | Tejidos
 | Disrupción celular

El recipiente del XRD-Mill McCrone también se fabrica en polipropileno. Aunque suele procesar matrices duras, no se espera un desgaste significativo: la mayor parte de la trituration se produce entre los 48 cuerpos de molienda y en condiciones muy suaves.

Ventajas

- Inerte y resistente a numerosas sustancias químicas, incluso agresivas
- Precio económico

Inconvenientes

- Baja dureza

Equipos con juegos de polipropileno:

- Molino de cuchillas GRINDOMIX GM 200
- XRD-Mill McCrone
- Molinos mezcladores MM 400, MM 500 nano, MM 500 vario, MM 500 control y CryoMill (con tubos de reacción Safe-Lock)

A-3.5. Policarbonato (plástico)

Definición

Dureza

122 HRR
(Rockwell)

Densidad

1,19 g/cm³

El policarbonato es un termoplástico que se obtiene por esterificación del ácido carbónico con dioles.

Se utiliza, por ejemplo, para proteger las capas de datos de CD y DVD, por su resistencia al rayado y al impacto. Resiste los ácidos minerales y la mayoría de los disolventes apolares, pero no la acetona, entre otros.

Aplicaciones de las herramientas de policarbonato

El recipiente estándar de los molinos de cuchillas GRINDOMIX

GM 200 y GM 300 es de policarbonato. Su transparencia permite observar el proceso de trituración. Además, el material es autoclavable.

Ventajas

- Transparente
- Autoclavable
- Económico

Inconvenientes

- No resiste determinados disolventes, como la acetona

Accesorios de policarbonato disponibles:

- Molinos de cuchillas GRINDOMIX GM 200 (recipiente de molienda), GM 300 (tapa y recipiente)

Campos de aplicación:

p. ej.
| Alimentos
| Piensos

Ejemplos de materiales:

| Frutas
| Verduras
| Queso
| Carne
| Embutidos
| Cereales

A-3.6. PMMA (plástico)

Definición

El PMMA es un termoplástico de gran robustez y estabilidad. Su excelente transparencia y resistencia al rayado permiten utilizarlo en recipientes para aplicaciones que requieren observar el proceso desde el exterior. Por ello, se emplea, entre otros fines, para seguir reacciones mecanoquímicas mediante espectroscopia Raman.

Dureza

D 75 – 85 (Shore)

Densidad

1,19 g/cm³

Ventajas

- Resistente a impactos y rayado
- Transparente
- Autoclavable

Inconvenientes

- No resiste determinados disolventes, como acetona y etanol

Campos de aplicación:

p. ej.
| Alimentos
| Química

Ejemplos:

| Mecanoquímica, espectroscopia Raman

Accesorios de PMMA disponibles:

- Tamizadoras por chorro de aire AS 200 jet, AS 200 jet pro y AS 200 jet pharma: tapas
- Molino mezclador MM 400: recipientes para mecano síntesis

A-4. Explicaciones

A-4.1. Dureza

La dureza de los materiales suele expresarse mediante distintas denominaciones y valores, como dureza Mohs o Brinell. Las escalas tienen orígenes diferentes. La escala de Mohs clasifica la resistencia al rayado de los minerales en diez niveles. Las escalas Brinell (HB), Rockwell (HRA, HRB y HRC) y Vickers (HV) proceden de la metalurgia. La dureza Shore es habitual en la industria de los plásticos.

La dureza es la resistencia mecánica que un material opone a la penetración de otro cuerpo. En los ensayos de materiales se determina, por tanto, midiendo la profundidad de penetración de un cuerpo definido sometido a una presión establecida.

No siempre es posible convertir de forma general los valores de una escala a otra. Para facilitar la comparación, la tabla de las páginas 76 y 77 muestra las escalas Mohs, Vickers, Rockwell (HRC, HRB y HRA) y Brinell.

Otra propiedad utilizada para caracterizar materiales es la resistencia a la tracción, que a veces se indica en lugar de la dureza. Suele expresarse en N/mm^2 . Para determinarla se aplica una fuerza de tracción hasta romper la probeta. En materiales elastoplásticos, la probeta puede deformarse y alargarse antes de la rotura.

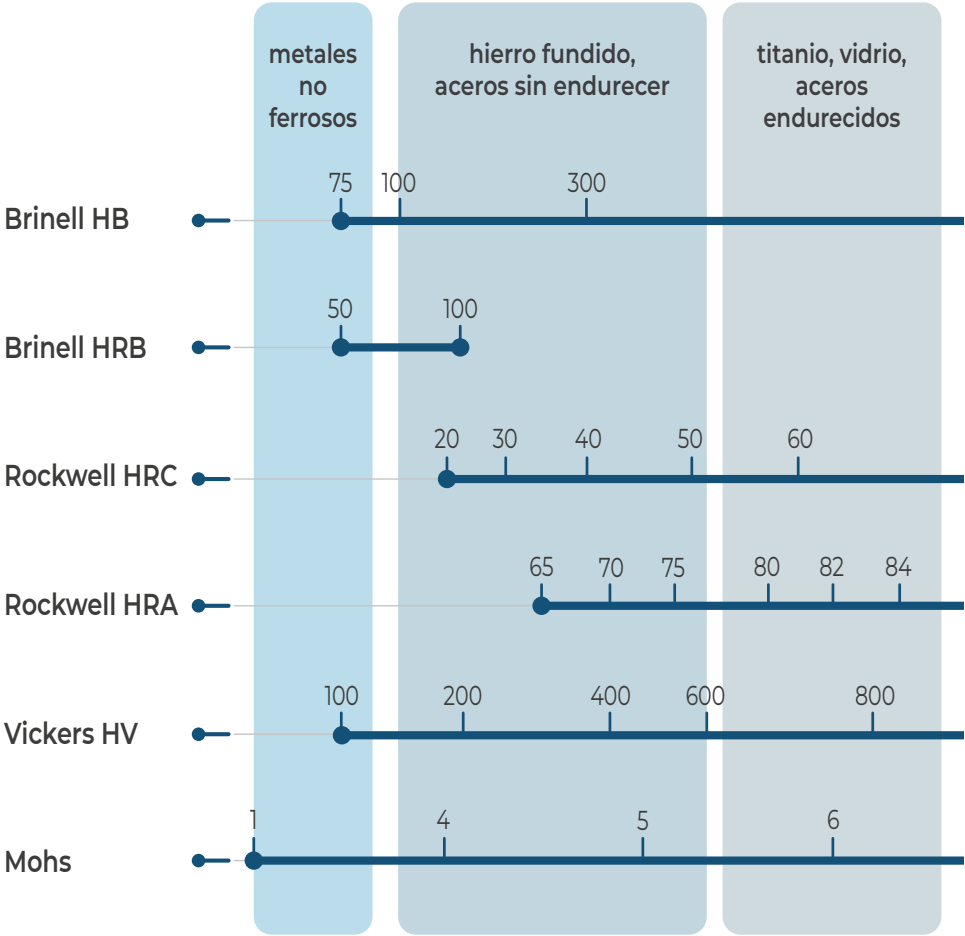
A-4.2. Composición química

Los datos de composición química son valores redondeados. Solo se consideran los componentes principales o característicos de cada material. Por ello, la suma de los porcentajes puede dar un resultado distinto del 100%.

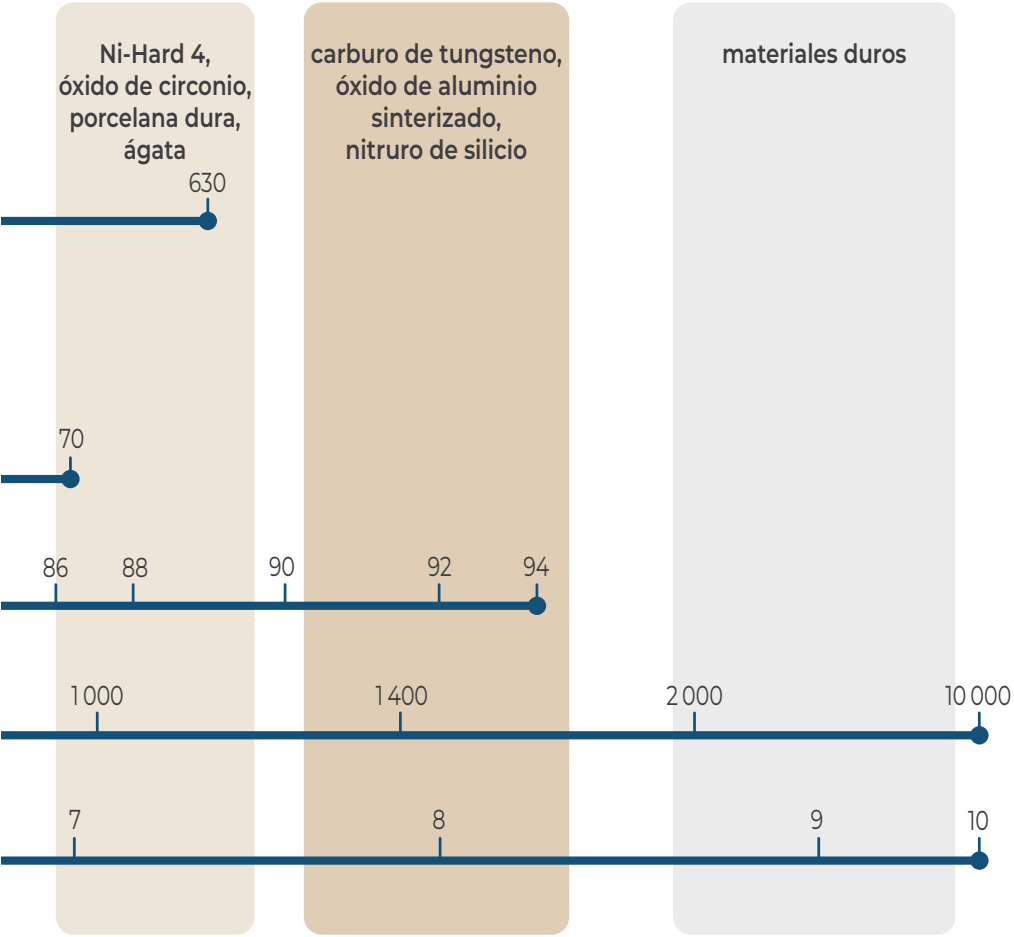
Los análisis más detallados, incluidos los componentes minoritarios, figuran en el PDF «Material Analyses of Equipment & Accessories», disponible en www.retsch.com.



A-4.3. Tabla comparativa de durezas con valores aproximados



La conversión entre escalas de dureza solo es aproximada.
Deben tenerse en cuenta los distintos métodos de ensayo y las clases de materiales.



Retsch GmbH

Retsch-Allee 1-5

42781 Haan

Alemania

Teléfono: +49 2104 2333-100

info@retschi.com www.retschi.es

PREMIUM QUALITY
MADE IN GERMANY



Como parte del Grupo Verder, la división Verder Scientific marca la pauta en el desarrollo, la fabricación y la comercialización de equipos de laboratorio y análisis. Sus equipos se utilizan en control de calidad, investigación y desarrollo para preparar y analizar muestras sólidas.

Desde hace décadas, nuestras empresas suministran equipos modernos y fiables a centros de producción e investigación, laboratorios de calidad y análisis y científicos de todas las disciplinas técnicas y naturales, ofreciendo soluciones para sus necesidades específicas.

