

Las aleaciones amorfas en el aula

Fernando Ignacio de Prada Pérez de Azpeitia^a y Alberto Apaolaza Sáez de Viteri^b

Resumen: Las aleaciones que presentan estructura amorfa masiva, o vidrios metálicos, son un nuevo material, formado por una mezcla de varios metales, que enfriados adecuadamente presentan características semejantes a los vidrios aislantes pero con una resistencia superior. Estas aleaciones permiten mostrar a los estudiantes las relaciones entre las nuevas tecnologías y los avances científicos; entre la estructura atómica y las propiedades físicas; entre las nuevas propiedades de los materiales y sus innovadoras aplicaciones que proporcionan importantes beneficios en numerosos campos, entre ellos, el del ocio y deporte.

Palabras clave: Aleaciones amorfas, vidrios metálicos, coeficiente restitución.

Abstract: The amorphous alloys, or bulk metallic glasses, are a mixture of several metals that when they are rapidly quenched present similar characteristics to the plastics but higher tensile strength. This alloy allows the teacher to show the relationships between: the new technologies and the scientific progress, the atomic structure and the physical properties, and finally, the new properties of the materials and their novel application provide such important benefits in numerous fields, among them, leisure and sports.

Keywords: Amorphous alloys, bulk metallic glass, restitution coefficient.

Introducción

Objetos tan diversos como raquetas de tenis, bates de béisbol, tablas de esquí, palos de golf, fibra óptica para telecomunicaciones, bisturís quirúrgicos, materiales para vehículos espaciales, carcasas para telefonía y colectores solares, sorprendentemente todos tienen algo en común, relacionado con los nuevos materiales que proporciona la Ciencia. Todos están fabricados con aleaciones metálicas formadas por diferentes átomos de metales enfriados por debajo del punto de solidificación mediante un nuevo procedimiento. Evitando la congelación normal, el líquido súper enfriado se espesa y deja de fluir, el resultado es que la mezcla solidifica de forma diferente formando una estructura molecular amorfa con propiedades mecánicas sorprendentes. Dado que su estructura se parece a la de los vidrios, estas aleaciones se denominan aleaciones amorfas o vidrios metálicos.

La disciplina que estudia la relación entre las propiedades macroscópicas de los materiales con la estructura microscópica de los sólidos se conoce como físico-química del estado sólido y constituye la base de la ciencia de los materiales. La investigación de técnicas de fabricación y procesos de nuevos materiales han permitido obtener compuestos y aleaciones cuyas sorprendentes propiedades mantienen a la ciencia viva y en continua revisión.

Este tipo de avances científicos no sería posible sin la necesaria cooperación científica y tecnológica que desarrollan grandes organizaciones públicas y privadas para hacer progresar a la ciencia. Los centros de enseñanza también pueden y deben desempeñar una función esencial, no sólo transmi-

tiendo conocimientos, sino también acercando a las nuevas generaciones a las fronteras de la investigación, impartiendo una enseñanza de la ciencia viva y de calidad que contribuirá decisivamente al desarrollo de nuevas vocaciones y a la valoración positiva de la ciencia en nuestra sociedad.

Aunque todos los estudiantes han oído hablar de átomos, no todos comprenden realmente cómo el empaquetamiento de los átomos puede afectar a las propiedades de los materiales y el significado correcto del término amorfo o vítreo. Como consecuencia, el objetivo propuesto es relacionar los conceptos de estructura cristalina y amorfa de las sustancias, con sus propiedades y aplicaciones, de ello la necesidad de diseñar experiencias que estimulen su curiosidad para analizar y comprender las analogías y diferencias entre los dos tipos de estructuras.

Origen y creadores

Los principales científicos responsables del descubrimiento y de la creación de las aleaciones amorfas o no cristalinas (*Vitreloy*) son el Dr. William L. Johnson profesor de ingeniería y Ciencia Aplicada del Instituto de Tecnología de California, y sus colaboradores, entre los que destacan el Dr. Atakan Peker director científico de *Tecnologías Liquidmetal* con sede en Lake Forest, California. Una de sus metas era desarrollar una aleación metálica elástica, resistente a la fractura y a la corrosión,^[1] que pudiese ser utilizada en alas de aviones a reacción y en componentes de motores para cohetes espaciales.

Si bien ya desde finales de la década de 1960, el científico belga Pol Duwez^[2] y sus colaboradores, realizaron investigaciones enfriando rápidamente átomos de oro y silicio para obtener las primeras aleaciones que permanecían amorfas a temperatura ambiente ($\text{Au}_{80\%}\text{Si}_{20\%}$), sin embargo, fue en el año 1992^[3,4] cuando los Drs. Johnson y Peker (Figura 1) iniciaron el desarrollo de propiedades y aplicaciones para el uso comercial de las aleaciones que contenían cinco elementos metálicos: circonio, titanio, níquel, cobre y berilio. La primera de estas aleaciones estaba formada por la siguiente composición centesimal: $\text{Zr}_{41,2\%}\text{Ti}_{13,8\%}\text{Cu}_{12,5\%}\text{Ni}_{10,0\%}\text{Be}_{22,5\%}$ a la que siguieron numerosas variaciones, tanto en los porcentajes ($\text{Zr}_{46,75\%}\text{Ti}_{8,25\%}\text{Cu}_{7,5\%}\text{Ni}_{10,0\%}\text{Be}_{27,5\%}$) como en los componentes metálicos ($\text{Zr}_{52,5\%}\text{Ti}_{5,0\%}\text{Cu}_{17,9\%}\text{Ni}_{14,6\%}\text{Al}_{10,0\%}$).



F. I. De Prada

A. Apaolaza

^a Dpto. de Física y Química. IES Las Lagunas
Avda. Gabriel García Márquez s/n. Rivas-Vaciamadrid. Madrid-28523

^b Laboratorio de Control de Calidad de Edificación del Gobierno Vasco. Vitoria-Gasteiz

C-e: fernando.pradaperez@educa.madrid.org

Recibido: 14/10/2007. Aceptado: 15/02/2008.

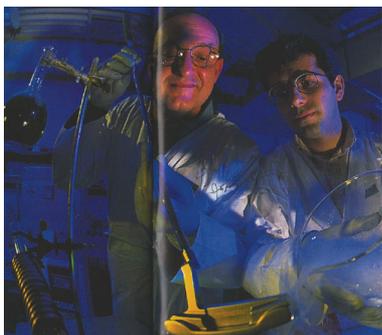


Figura 1. Drs. L. Johnson y A. Peker investigando las propiedades de un palo de golf fabricado con *Vitreloy*.

Actualmente existen numerosas patentes y marcas registradas mundiales creadas por *Liquidmetal Technologies* (California) relativas a la composición, el proceso de fabricación y el uso de esta nueva tecnología. Diferentes centros de investigación de todo el mundo, entre los que se encuentran la Universidad Complutense de Madrid y la Autónoma de Barcelona, han participado en las investigaciones sobre esta clase de aleaciones.

El descubrimiento de estos nuevos materiales proporciona soluciones revolucionarias que prosiguen en continuo desarrollo. Sin embargo, no todo son ventajas, un inconveniente es su elevado precio, en la actualidad son varias veces más caros que el aluminio y mucho más que el acero, debido a que sus constituyentes necesitan ser de elevada pureza, una pequeña cantidad de oxígeno o carbono en la mezcla puede originar la cristalización de la aleación, por ello continúan las investigaciones para obtener aleaciones amorfas utilizando componentes más económicos.

El Doctor L. Johnson opina que en el futuro todos los metales y aleaciones se fabricarán con estructuras amorfas para optimizar sus propiedades, mejorando la seguridad de casas, edificios y vehículos. Sus recientes trabajos están encaminados al desarrollo de una teoría que establezca el principio físico fundamental que explique el movimiento de los átomos para configurar estructuras amorfas.

Estructura y propiedades

Dos son las principales características que presentan estas aleaciones. En primer lugar una estructura atómica amorfa, cualidad sin precedentes para una estructura metálica. En segundo lugar, una composición química de varios componentes metálicos, que en función de sus porcentajes (Figura 2) puede ser optimizada para obtener diferentes propiedades y aplicaciones.

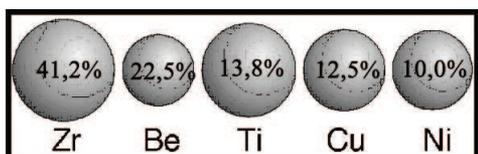
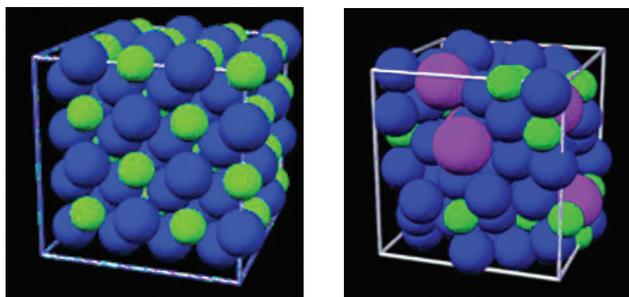


Figura 2. Composición de la aleación (% en peso).

La estructura atómica es el aspecto más interesante de las aleaciones amorfas por ser la diferencia fundamental respecto a los metales y aleaciones normales, caracterizados por su periodicidad, con una disposición de los átomos que muestra patrones repetidos a lo largo del espacio. Esta disposición cristalina limita el comportamiento y propiedades de los me-

tales. Sin embargo, las aleaciones amorfas o no cristalinas, poseen una estructura atómica desordenada. La clave está en las condiciones en que los átomos son enfriados, dependiendo del procedimiento pueden adoptar diferentes tipos de estructuras: ordenada o desordenada (Figuras 3a y 3b).



Figuras 3a y 3b. Estructura cristalina (izquierda) frente a estructura amorfa (derecha).

En el proceso clásico de obtención de aleaciones, la mezcla fundida solidifica formando un sólido cristalino con un estado de mínima energía. Así es como se forman los metales normales, y la mayoría de los sólidos. En el proceso global de producción de un vidrio metálico se distinguen dos etapas: la fabricación de la aleación, generalmente a partir del tratamiento a elevada presión y por encima del punto de fusión de los elementos en forma de polvo, que se puede realizar en forma óptima con horno de inducción,^[5] y un enfriamiento ultrarrápido del líquido para formar la aleación. Cuando la mezcla fundida se enfría rápidamente, del orden de 1°C a 100°C por segundo,^[6] los átomos no tendrán ni el tiempo ni la energía suficiente para desplazarse y colocarse en una estructura ordenada y solidificarán en un estado amorfo evitando la cristalización.

El subenfriamiento es un proceso físico que consiste en reducir la temperatura de un líquido por debajo del punto normal de congelación mientras permanece en estado líquido sin solidificarse. El fenómeno del subenfriamiento se presenta en sustancias puras, que se enfrían lentamente. Mientras que los átomos no se agrupan para formar un núcleo sólido, la muestra permanece en el estado líquido. Una vez formado este núcleo crece rápidamente por toda la muestra que empieza a enfriarse mientras cambia del estado líquido al sólido. El resultado es un sólido cuyos átomos se mantienen dispersos en una red amorfa. Esta estructura desordenada, encontrada más comúnmente en los vidrios de las ventanas, tiene propiedades que mejoran las del resto de aleaciones:

- Elevado límite de elasticidad, reteniendo su forma original después de ser sometido a elevadas cargas y tensiones.
- Alta resistencia a la deformación, sobrepasa la resistencia propia de los metales y otras aleaciones cristalinas
- Elevado módulo elástico o de Young, este parámetro indica la fuerza que se necesita ejercer para alargar o estirar un material.
- Elevada dureza
- Alta resistencia a la corrosión y al desgaste.
- Buena relación resistencia/peso

En la Tabla 1 se observa como el valor de la resistencia a la tracción de la aleación vitreloy es dos y tres veces mayor que para el resto de los metales. Esta magnitud es una medida de la tensión necesaria para deformar permanentemente el mate-

Tabla 1 [7]: Propiedades mecánicas de la aleación Vitreloy frente a otras aleaciones.

Propiedades	Vitreloy	Aluminio	Titanio	Acero
Densidad (kg/m ³)	6.000	2.600-2.900	4.300-5.100	7.800
Resistencia a la tracción (GPa)	1.90	0.10-0.63	0.18-1.32	0.50-1.60
Límite de elasticidad (%)	2	~ 0.5	~ 0.5	~ 0.5
Módulo de Young (GPa)	95	70	116	200
Resistencia a la fractura (MPa·m ^{1/2})	20-140	23-45	55-115	50-154
Resistencia/Densidad (GPa·g ⁻¹ ·cm ⁻³)	0.32	< 0.24	< 0.31	< 0.21

rial e indica la resistencia a la flexión, a romperse, y a la compresión. Además, la buena relación resistencia/densidad, hace posible que pueda reemplazar al aluminio en las aplicaciones en que el peso es un factor determinante y debe ser reducido (diseño aeroespacial), con la ventaja de que es mucho más resistente a la deformación y a la fractura. Comparado con otras aleaciones, las amorfas tienen una densidad intermedia pero mayor límite de elasticidad, semejante a los polímeros (figura 4), incluso después de aplicar elevadas fuerzas de tracción el material recupera elásticamente su forma inicial.

La capacidad de las aleaciones amorfas de recuperar su forma inicial, aun estando sometidas a elevadas tensiones, es una de las razones por la que se emplea en material deportivo: tablas de esquí y snowboard, bates de béisbol, palos de golf, raquetas de tenis, etc.



Figura 4. Límite de elasticidad (%) de diferentes materiales.

En las raquetas de tenis, la propiedad de este material de no deformarse por el impacto de la pelota, evita la dispersión de la energía y aumenta la resistencia a la torsión del marco (Figuras 5a y 5b), como resultado la pelota se golpea con más control y mayor potencia.



Figuras 5a y 5b. Las raquetas que presentan esta tecnología (izquierda) ofrecen un marco más resistente a la torsión y a la deformación que las convencionales. A la derecha marco de raqueta (aleación de titanio) fracturado por el impacto de una pelota de tenis.

Sin embargo, no todo son ventajas, algunas aleaciones amorfas no pueden ser utilizadas a temperaturas elevadas, porque bajo tales condiciones, el material se ablanda y pierde su dureza. Aunque su bajo punto de fusión hace más fácil su moldeo, también limita su uso; por ejemplo, se fundirían si se utilizaran en las turbinas del motor de un avión. Además, puesto que la aleación se debe enfriar de forma rápida, no debe tener demasiado grosor. Así una placa se puede fabricar de varios metros de largo y ancho, pero solamente de unos centímetros de grosor. El coste es otra desventaja, con un precio similar al titanio, pero varias veces más costoso que el aluminio o el acero inoxidable. El elevado coste limita su uso en la fabricación de productos de consumo frecuentes como las carrocerías de los automóviles.

Sin embargo, no todo son ventajas, algunas aleaciones amorfas no pueden ser utilizadas a temperaturas elevadas, porque bajo tales condiciones, el material se ablanda y pierde su dureza. Aunque su bajo punto de fusión hace más fácil su moldeo, también limita su uso; por ejemplo, se fundirían si se utilizaran en las turbinas del motor de un avión. Además, puesto que la aleación se debe enfriar de forma rápida, no debe tener demasiado grosor. Así una placa se puede fabricar de varios metros de largo y ancho, pero solamente de unos centímetros de grosor. El coste es otra desventaja, con un precio similar al titanio, pero varias veces más costoso que el aluminio o el acero inoxidable. El elevado coste limita su uso en la fabricación de productos de consumo frecuentes como las carrocerías de los automóviles.

Aplicaciones

Las características especiales de la aleación amorfa y el hecho de que puedan procesarse utilizando técnicas convencionales las hace útiles en numerosas aplicaciones comerciales, que van desde el sector de consumo, al industrial y militar.

- Las primeras aplicaciones se realizaron en 1996 en el diseño de palos de golf. Es conocido que un material muy resistente transfiere mejor la energía del impacto de un palo de golf a la bola. Estas aleaciones son más de dos veces más resistentes que muchos otros materiales habitualmente utilizados en el golf, como el titanio y el acero, y poseen una densidad intermedia entre ambos. De este modo, la bola del golf puede ser golpeada más lejos. Algunas pelotas de golf también se fabrican con la base interna de este material y con el mismo objetivo.
- En el año 2003, otra marca deportiva, incorporó la aleación *liquidmetal*® en una nueva línea de raquetas de tenis, aplicándola a cuatro áreas estratégicas del marco de las raquetas (Figura 6). Como el material absorbe menos energía, permite una transferencia más eficiente de la energía a la bola. Esto trae como consecuencia que casi toda la energía del impacto puede ser utilizada para despedir la pelota, de forma que no se pierde prácticamente nada de energía al golpear la pelota de tenis. Este modelo de raqueta ha sido utilizado por tenistas como Andre Hagáís, Marat Safín o Anastasia Myskina.
- También dentro del mundo del deporte, un importante fabricante mundial de bates de béisbol ofrece una gama completa de bates de alto rendimiento recubiertos de una capa de *liquidmetal*®, si bien, actualmente no están homologados por la Federación Española de Béisbol.
- En telecomunicaciones y electrónica, se fabrican cubiertas de teléfonos portátiles elásticas y resistentes, así como piezas



Figura 6. La Ciencia no debe mostrarse exclusivamente en los libros de texto. Estudiante mostrando las aplicaciones de las aleaciones amorfas en la VIII Feria Madrid es Ciencia (2007).

y bisagras elásticas que forman parte de diferentes dispositivos electrónicos (reproductores *MP3*, memorias *flash USB*).

- En medicina, se están desarrollando productos ortopédicos biocompatibles para implantes tales como prótesis de cadera y de rodilla, sustituyendo a los actuales de titanio o acero. También se utilizan en láminas de escalpelos que son más fuertes y afiladas que el acero, menos costosas que el diamante, y más duraderas que las actuales.

- Debido a su resistencia de la corrosión y al desgaste, se aplica en forma de capas protectoras en maquinaria industrial y en la utilizada para prospecciones petrolíferas bajo el mar. Para la industria, esta tecnología ofrece una maquinaria que proporciona las ventajas de una superficie resistente en situaciones de elevado desgaste y corrosión. Estos productos poseen las características adecuadas para ampliar la vida de los materiales, incluyendo un bajo coeficiente de fricción, baja contracción y una buena resistencia al desgaste.

- El departamento de defensa militar de EEUU, está investigando sustituir la actual munición perforante (KEP: *Kinetic Energy Penetrator*), utilizada contra vehículos blindados, puesto que contiene barras de uranio agotado, que al ser ligeramente radiactivas pueden causar efectos perjudiciales para la salud, por la nueva aleación amorfa que es un material más seguro y no presenta ningún peligro medioambiental.

- *Liquidmetal Technologies*, *NASA's Jet Propulsion Laboratory* y el Departamento de Energía de Estados Unidos investigan conjuntamente la aleación en condiciones de microgravedad buscando materiales útiles para la industria aeroespacial. En el año 2001 lanzaron una nave espacial con la misión de capturar muestras del viento solar sobre una placa de este material diseñada especialmente con el fin de absorber los iones procedentes del Sol y determinar la composición isotópica de la materia solar.

Además de los productos comerciales actualmente disponibles, numerosos proyectos de investigación en marcha proporcionarán para los próximos años materiales con mejores propiedades, nuevas aplicaciones y menor coste.

Experiencia: determinación del coeficiente de restitución

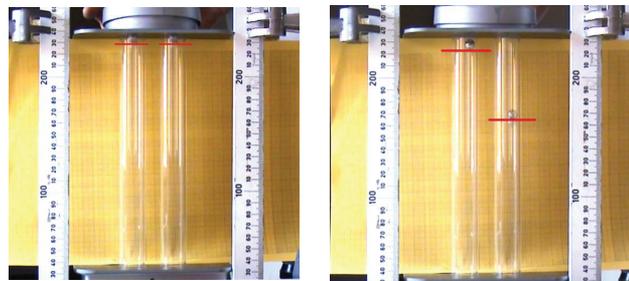
Esta experiencia tiene como objetivo que los estudiantes comprendan y comprueben las relaciones y conexiones entre distintos sectores de la Ciencia, en este caso entre la Física, la Química y la Tecnología, trabajando unidas para proporcionar materiales útiles a la sociedad. La demostración puede

llevarse a cabo como introducción a la Física y Química en diferentes niveles educativos preuniversitarios (ESO y Bachillerato), o más adelante, al desarrollar los temas de estructura de la materia y enlace, o el de energía y sus transformaciones. Lo más interesante didácticamente es que permite relacionar contenidos de química; enlace químico, estructuras cristalinas y amorfas, propiedades de los metales y aleaciones, con otros de física; principio de conservación de la energía, choques elásticos e inelásticos, y coeficiente de restitución.

Comparado con las aleaciones metálicas cristalinas, la aleación amorfa puede soportar una elevada tensión sin perder su forma, ser mucho más resistente a la deformación permanente por el impacto, y tres veces más elástica. Un sencillo experimento permite comprobar algunas características y propiedades que hacen posible sus múltiples aplicaciones.

Materiales

- Un disco de titanio (aluminio o acero) y otro disco de la aleación *liquidmetal*^[8] $Zr_{41.2\%} Be_{22.5\%} Ti_{13.8\%} Cu_{12.5\%} Ni_{10.0\%}$
- Dos tubos de plástico de 20 cm, dos bolas de acero inoxidable y un imán con palanca para accionar la caída simultánea de las bolas (Figura 7a).
- Dos reglas graduadas, papel milimetrado y cronómetro.



Figuras 7a y 7b: Posición inicial de las bolas de acero (izquierda) y altura máxima alcanzada en el primer bote (derecha)

Procedimiento experimental

- En el interior de los tubos de plástico se colocan sendas bolas de acero imantadas sobre una lámina magnética situada en la parte superior. A continuación, mediante un sistema de palanca se desplaza el imán para que caigan simultáneamente las dos bolas, desde la misma altura, sobre las bases metálicas: una de titanio (aluminio o cualquier otro material) y otra de la aleación amorfa.
- En el primer bote se mide la altura que alcanza cada bola (Figura 7b). Después de repetir varias veces el proceso, se obtiene un valor medio de las alturas y con este dato se calcula el coeficiente de restitución de los materiales a partir de las alturas inicial y final.
- Otras magnitudes que se pueden medir y comparar son el tiempo total que permanecen botando las dos bolas sobre cada disco y el número total de rebotes hasta que se detienen.

Experimentalmente podemos comprobar que si dejamos caer una pelota de goma al suelo desde una altura h , después de rebotar no vuelve a la posición de partida, lo que indica que la energía cinética no se conserva. Para cuantificar las pérdidas de energía se introduce el coeficiente de restitución^[9] k ,

que se define como el cociente entre los módulos de los impulsos de recuperación (I_r) y de deformación (I_d):

$$k = I_r / I_d$$

Cuando una pelota se deja caer libremente desde una altura h_0 hasta el suelo, la expresión que relaciona el coeficiente de restitución con las alturas alcanzadas después de cada rebote, se determina a partir de las velocidades que alcanza la pelota en el momento de cada choque. La velocidad de caída libre desde una altura h_0 es:

$$v_1 = (2gh_0)^{1/2}$$

Después del primer rebote la altura alcanzada es h_1 y la velocidad al chocar nuevamente contra el suelo:

$$v'_1 = (2gh_1)^{1/2}$$

De acuerdo con la definición del coeficiente de restitución para dos partículas que colisionan y sustituyendo los impulsos por la variación en la cantidad de movimiento, se obtiene:

$$k = (v'_1 - v'_2) / (v_1 - v_2)$$

Donde v_2 y v'_2 corresponden a la velocidad del suelo que se considera fijo, por tanto son nulas, resultando que para una bola que rebota en el suelo, el coeficiente k se puede expresar en función de la altura alcanzada por la bola antes y después del choque:

$$k = (v'_1 / v_1) = (h_1 / h_0)^{1/2}$$

Razonando del mismo modo para el segundo rebote:

$$k = (h_2 / h_1)^{1/2} = (h_2 / h_0)^{1/4}$$

Y generalizando:

$$k = (h_1 / h_0)^{1/2} = (h_2 / h_1)^{1/2} = (h_n / h_{n-1})^{1/2}$$

es decir,

$$k = (h_1 / h_0)^{1/2} = (h_2 / h_0)^{1/4} = (h_3 / h_0)^{1/6} = (h_n / h_0)^{1/2n}$$

El coeficiente de restitución o de elasticidad representa el grado en el que el choque es elástico. En un choque perfectamente elástico, las pérdidas de energía cinética son nulas, siendo el coeficiente de restitución igual a uno. Después de la colisión, uno o los dos cuerpos pueden deformarse, pero rápidamente recuperan su forma. En el choque totalmente inelástico, no hay rebote, el coeficiente de restitución es cero, y uno o ambos objetos quedan deformados permanentemente. Por ejemplo, al dejar caer una pelota plástica (de las utilizadas para relajación o en rehabilitación) se deforma, no recupera su forma y no tiene lugar ningún bote.

Resultados

En la experiencia, el coeficiente de restitución de los materiales se determina a partir de la altura inicial de caída y de la altura que alcanza en el primer bote la bola de acero. De los datos de la tabla 2, se comprueba como para la aleación amorfa el coeficiente de restitución se encuentra muy próximo al valor máximo, superando los valores obtenidos para el resto de los metales. Comprobándose como las pérdidas de energía cinética son muy pequeñas, inferiores a la disipada por los otros materiales. De los datos obtenidos, se deduce que las pérdidas de energía mecánica en el primer bote son sólo del 4% para la aleación *liquidmetal*, frente al 33% para el titanio y al 44% para el aluminio.

El tiempo total se ha medido desde que se deja caer cada bola hasta que termina de rebotar y se detiene sobre cada uno

Tabla 2. Valores medios obtenidos de diferentes magnitudes relacionadas con el rebote.

Material	Altura Inicial h_0 (cm)	Número de rebotes	Tiempo Total (s)	Altura 1 ^{er} bote h_1 (cm)	Coficiente Restitución $k = (h_1/h_0)^{1/2}$
<i>Liquidmetal</i> ®	20,0	60	13,0	19,2	0,98
Titanio	20,0	19	4,1	13,5	0,82
Aluminio	20,0	10	2,6	11,2	0,75

de los discos metálicos. Según los datos proporcionados por el fabricante, en condiciones óptimas, las bolas llegan a rebotar sobre la superficie de aluminio y titanio durante 17s y 22s respectivamente, y sobre la superficie de *liquidmetal* durante 1min. y 21s. En el experimento los valores obtenidos son bastante menores, 17s para la aleación y menos de 5s para los otros dos metales, si bien las proporciones entre ellos se mantienen dentro del mismo orden. El tiempo total de rebote de la aleación *liquidmetal* triplica los valores para el caso del titanio y aluminio. La misma relación se observa en el número veces que rebota la bola de acero hasta que se detiene totalmente sobre la superficie de los discos.

Las magnitudes analizadas confirman las mejores propiedades mecánicas de estas nuevas aleaciones frente a otros metales y como la investigación y el desarrollo de nuevos materiales se encuentra en continua revisión y progresión.

Discusión

Al dejar caer las bolas desde la misma altura, son diversas las formas de disipación de la energía cinética, desde los choques y fricción con las moléculas de aire en el interior del tubo hasta la producción de calor y sonido al colisionar contra los átomos de los discos situados sobre la superficie. Considerando que para ambos materiales, estos factores son los mismos, la diferencia en la altura alcanzada y el tiempo de rebote se debe fundamentalmente a la diferencia en la energía transferida entre la bola y cada una de las superficies. Es evidente que debe haber algo muy diferente en la estructura de ambos materiales que explique la diferencia en su comportamiento al botar.

Para comprender mejor la diferente interacción entre la bola y la superficie es necesario analizar la estructura de los materiales; el titanio y el aluminio, con estructura cristalina, y la aleación, con estructura amorfa. Los metales se caracterizan por su estructura cristalina, estando los átomos colocados de forma ordenada, se repite una pequeña unidad denominada celda elemental, en algunos casos formada por diferentes átomos, en las tres direcciones del espacio, y de esta forma, se construye una estructura con los átomos perfectamente ordenados.^[10] Pero realmente esto solo ocurre en un sólido perfecto e ideal. Todas las estructuras cristalinas contienen defectos, entre los que se incluyen vacantes o espacios vacíos que deberían estar ocupados por átomos, impurezas formadas por átomos de otros elementos, y dislocaciones o presencia de semiplanos atómicos extra, que ejercen una gran influencia en las propiedades físicas y químicas de los sólidos. Aunque los átomos en un sólido están empaquetados densamente, el sólido puede deformarse debido a la movilidad causada por las dislocaciones presentes en el cristal, efecto que origina un desplazamiento de los planos, existiendo muchas direcciones en las que se puede producir. Por ejemplo, los cables de cobre

son fáciles de doblar debido a que la estructura contiene planos de átomos compactos que pueden deslizarse unos sobre otros. En la estructura amorfa el sólido no tiene una estructura regular y periódica. Los átomos de la aleación amorfa se encuentran empaquetados densamente, pero dispuestos sin orden. A causa de los diferentes tamaños de estos átomos y de su disposición desordenada en el sólido, no hay grupos de átomos que puedan deslizarse unos sobre otros. Una consecuencia de esta baja movilidad atómica es un bajo rozamiento interno que minimiza la conversión de la energía cinética durante el choque en calor.

Otra diferencia se puede apreciar en las marcas que se producen en la base del disco de aluminio donde la bola ha rebotado (Figura 8). Observándola con una lupa binocular de ocho aumentos, se encuentran unos pequeños hoyos consecuencia de los choques de las bolas de acero sobre la superficie que evidencian el efecto de una pérdida de energía. Las marcas son resultado directo del impacto que provoca la formación de numerosas dislocaciones causando una deformación permanente del material. Si la bola contiene inicialmente una cantidad de energía cinética, parte de esta energía se pierde en cada bote y se invierte en el movimiento de las dislocaciones y en el deslizamiento de los planos atómicos.



Figura 8. Marcas sobre la superficie de aluminio originadas por el impacto de una bola de acero al caer.

Estas marcas no se producen en la base de la aleación amorfa porque la disposición al azar de los átomos en este material dificulta el movimiento, de este modo la energía cinética no se pierde en el movimiento de las dislocaciones. La diferencia se debe, en gran medida, a la incapacidad de los átomos de las aleaciones amorfas para deslizarse unos sobre otros durante la colisión. Sólo una pequeña parte de la energía cinética de la bola se convierte en calor, lográndose mayor altura en el bote.

Conclusión

La ciencia contribuye a mejorar continuamente la calidad de vida y el bienestar de la sociedad a través de sus múltiples aplicaciones. Sin embargo, los estudiantes no siempre son conscientes de la necesidad de los avances tecnológicos en el campo de la química ni del efecto favorable que su desarrollo genera sobre la mejora continua de la calidad de vida. Este desconocimiento repercute negativamente en la valoración positiva de la química, que se refleja tanto en el descenso de vocaciones científicas como en cierto rechazo social al término química.

Muchos estudiantes de secundaria y bachillerato se preguntan acerca de la importancia del conocimiento de la química, y en concreto, de la estructura de la materia, en su entorno más cercano y de cómo puede afectar a sus vidas. Los profesores debemos dar respuestas a estas preguntas estimulando su curiosidad (Figura 9) e incentivando a los alumnos a proseguir sus estudios en áreas científicas.



Figura 9. La ciencia más útil es aquella cuyo fruto es el más aplicable y comunicable. Jóvenes interesadas en las propiedades de los nuevos materiales.

Desde una perspectiva científica, el conocimiento de la estructura microscópica de un material permite modificar sus propiedades. Las nuevas aleaciones que proporciona la ciencia, son un buen ejemplo de como la investigación sobre la estructura de las sustancias conduce a la obtención de nuevos materiales con mejores propiedades y numerosas aplicaciones que nos hacen la vida más cómoda. A la vez, es una buena ocasión para ilustrar cómo la química puede considerarse una ciencia central al interactuar con todos los campos científicos.

Agradecimientos

A la Consejería de Educación –Dirección General de Universidades e Investigación– de la Comunidad de Madrid por la creación de la Feria Madrid por la Ciencia, y a todos sus organizadores, que estimulan al profesorado en la búsqueda de nuevos recursos didácticos para poner en práctica en los centros de enseñanza preuniversitarios y, de esta forma, mejorar la calidad de la enseñanza científica. Conocimientos que posteriormente serán transmitidos por los propios estudiantes a todos los ciudadanos interesados por la Ciencia en general y la Química en particular.

Bibliografía

- [1] C. G. Gilbert, R. O. Ritchie, W. L. Johnson, *Appl. Phys. Lett.* **1997**, 71(4), 476–478.
- [2] P. Duwez, W. Klement, R.H. Willens, *Nature* **1960**, 187(4740), 869–870.
- [3] A. Peker, W. L. Johnson, *Appl. Phys. Lett.* **1993**, 63(17), 2342–2344.
- [4] W. L. Johnson, *Mater. Sci. Forum* **1996**, 225–227(Part 1), 35–50.
- [5] G.A. Hernando en *Nuevos Materiales: Los Vidrios Metálicos*, EUEDEMA, Ediciones de la Universidad Complutense, **1987**, pp. 43–48.
- [6] R. Busch, S. Schneider, A. Peker, W. L. Johnson, *Appl. Phys. Lett.* **1995**, 67(11), 1544–1546.
- [7] M. Telford, *Materials Today*, **2004**, 7(3), 36–43.
- [8] K. J. Nordell, N. D. Stanton, G. C. Lisensky, A. B. Ellis en *The Atomic Trampoline Kit: Demonstrations with Amorphous Metal*. Institut for Chemical Education, University of Wisconsin-Madison, **2000**.
- [9] P. A. Tipler en *Física para la Ciencia y la Tecnología*, Vol. I, Ed. Reverté, Barcelona, **2001**.
- [10] R. Chang en *Química*. Ed. Mac Graw Hill, 6ª Edición, México, **1999**.