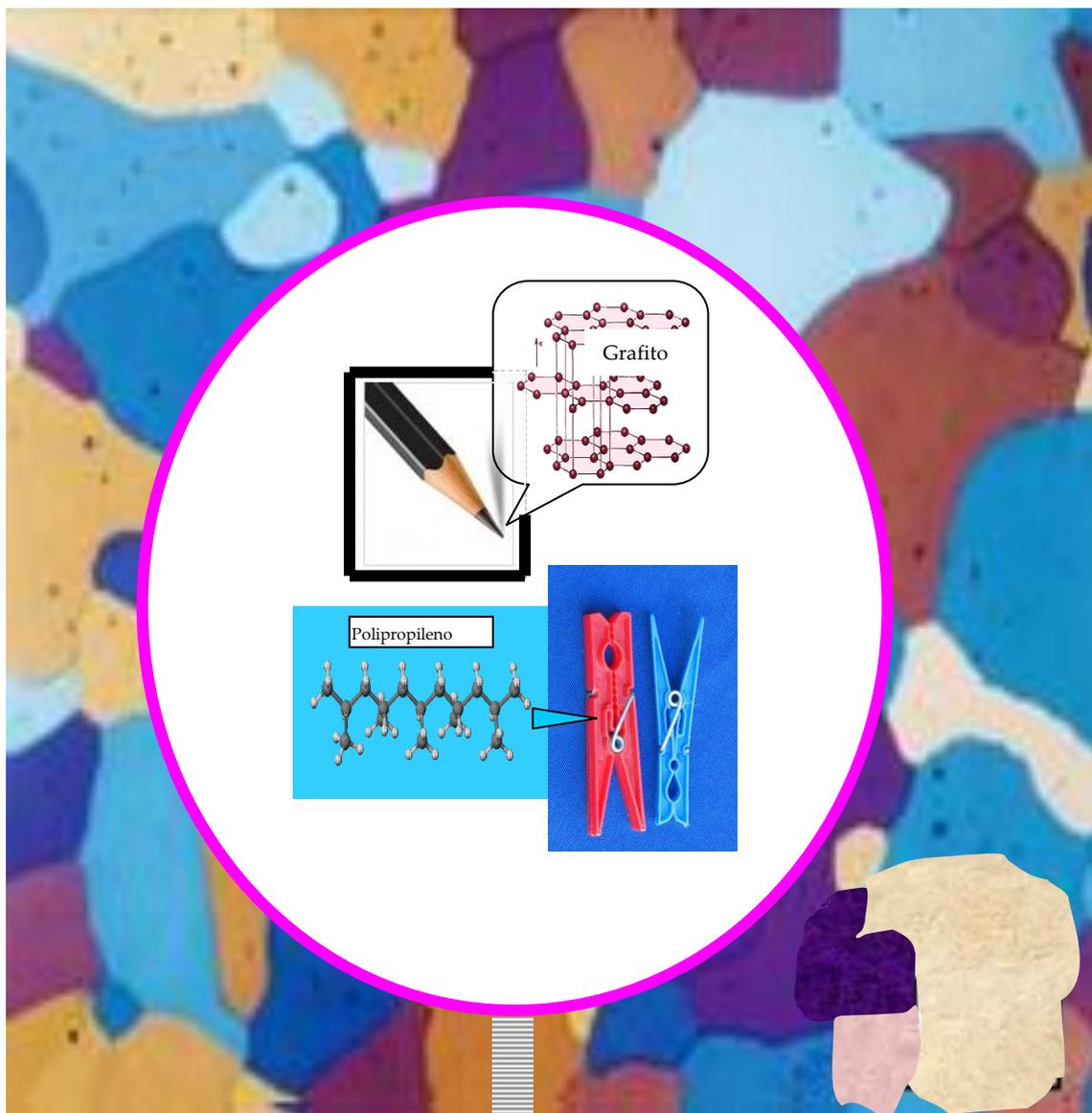


# ESPIANDO A LOS MATERIALES

Alicia Sarce



INSTITUTO SABATO  
Universidad Nacional de San Martín  
Comisión Nacional de Energía Atómica

## *Espiando a los materiales*

Espiar a los materiales para conocer cómo son en su interior es una aventura fascinante y en este libro comenzaremos a introducirnos en esa aventura.

Así, conoceremos cómo están distribuidos geoméricamente los átomos en metales, en cerámicas y en polímeros; cómo son las fuerzas que mantienen unidos esos átomos; cómo pueden moverse en los cristales y... varias cosas más.

Con estas nociones, y realizando los experimentos y trabajos que se proponen, ya se podrán responder muchas preguntas. Como ejemplos, vayan estas tres:

**¿Por qué queda escrito lo que escribimos con un lápiz?**

**¿Por qué después de estirar una bandita elástica puede volver a su tamaño original?**

**¿Por qué no pasa lo mismo si se estira un trozo de bolsa de supermercado?**

Además, una muy breve mención a diferentes microscopios ópticos, electrónicos, de efecto túnel; una mirada al modelo más sencillo usado para describir el átomo; una guía para “construir” algunas estructuras cristalinas con esferas de poliestireno expandido y escarbadiantes; las instrucciones a seguir para pulir mecánicamente la superficie de un metal y los pasos para medir una mesa y calcular el error en la medición, son temas por los que nos pasea el libro y que contribuyen a que podamos espiar mejor a los materiales. Encontrar los errores en El Juego de los 7 errores, será una comprobación de que han espiado bien!

### *De la autora*

Doctora en Ciencias Físicas por la Universidad de Buenos Aires.

Actualmente es Investigadora Consulta de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

Fue investigadora y docente del Departamento Materiales de la CNEA y del Instituto Sabato (Universidad Nacional de San Martín (UNSAM) – CNEA).

Directora de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales del Instituto Sabato desde la creación de la carrera en 1994 hasta el año 2008.



Sarce, Alicia

Espiando a los materiales. - 1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: el autor, 2014.  
E-Book.

ISBN 978-987-33-6298-9

1. Ingeniería de Materiales. 2. Pedagogía. I. Título  
CDD 620.11

Fecha de catalogación: 05/11/2014

Edición PDF: M. Valeria Hey

Fondo de tapa: Micrografía de una chapa de aluminio anodizado. R. Montero

© Sarce, Alicia

Página Instituto Sabato ([www.isabato.edu.ar](http://www.isabato.edu.ar))

Prohibida su reproducción total o parcial sin citar la fuente.

ISBN: 978-987-33-6298-9

Queda hecho el depósito que marca la ley 11.723

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer sinceramente a todos los que, desde distintas miradas, tuvieron la paciencia de leer sucesivas versiones del libro, aportándoles valiosos comentarios y aún más:

A Paula Alonso, quien leyó el primer escrito. Sus sugerencias me llevaron a incluir ejemplos y el importantísimo tema que se desarrolla en el Epílogo.

A Marcela Barrera, quien tuvo la versión inicial y sucesivas correcciones, por sus comentarios, por su interés y por su acompañamiento.

A Sergio Aricó que, al igual que Paula y Marcela, es un sólido investigador en el área de la Ciencia de Materiales, porque leyó la versión final. Que pasó a ser la casi final, porque la nueva versión final incorporó todos sus acertados consejos.

A Juan de Xammar Oro, quien además de aportar conocimientos a la Biofísica, realiza una importante tarea de divulgación de la ciencia a través de sus publicaciones. Su opinión, apoyada en su pericia, fue valiosísima.

A Martín Alvarez, a quien le interesa la ciencia, por haber leído el primer borrador el año en que inició la carrera de medicina en la UBA y por señalar en él, con acierto, las partes que no estaban claras para un lector alejado de la Ciencia de Materiales.

A Martina Justus, porque la cuidadosa lectura que hizo cuando acababa de finalizar el segundo año del secundario en las Escuelas Técnicas Raggio constituyó, para el libro, una prueba de fuego.

A María Belén Aricó, que estaba comenzando su tercer año del secundario, porque aceptó leer algunos párrafos, dándoles su aprobación.

A José Galvele, destacadísimo investigador argentino. Él solía comenzar las charlas que daba a jóvenes estudiantes con la pregunta que está en el inicio del Prefacio. Yo estoy segura de que se hubiera sentido contento si le hubiera pedido que me la “prestara”, para iniciar con ella también este libro. No lo pude hacer, pero igual me atreví a tomarla, a incluirla y hacérsela a los lectores.

A Liliana Roberti, por estar siempre presente.

**Dedicado a:**

*Jorge Kittl*

*Eduardo Savino*

*José Galvele*

de quienes aprendí

y

*a los lectores del libro*

## ÍNDICE

PREFACIO .....	9
LOS ÁTOMOS.....	12
LOS MATERIALES CRISTALINOS .....	15
LOS CRISTALES REALES NO SON PERFECTOS .....	19
LOS MATERIALES NO CRISTALINOS .....	20
MATERIALES CERÁMICOS.....	23
UNIONES ENTRE LOS ÁTOMOS .....	27
ESPIANDO CON EL MICROSCOPIO .....	29
LOS ÁTOMOS NO ESTÁN QUIETOS .....	34
UN EXPERIMENTO .....	38
JUEGO DE LOS SIETE ERRORES.....	44
EPÍLOGO .....	46
¿Qué significa medir?.....	46
EXPERIMENTO DEL EPÍLOGO.....	48
APÉNDICE I.....	54
Representación de los átomos .....	54
APÉNDICE II.....	59
A) Estructuras de diferentes metales y tamaños de las celdas geométricas que las describen.....	59
B) Cómo construir las diferentes estructuras.....	61
APÉNDICE III .....	66
Otros polímeros .....	66
APÉNDICE IV .....	68
Lupa.....	68
Microscopios .....	69
Microscopio óptico.....	69
Microscopio electrónico .....	71
Microscopio de efecto túnel .....	72
APÉNDICE V .....	73
Trabajo práctico: Pulido mecánico de un metal .....	73
APÉNDICE VI.....	76
EPÍLOGO: Parte 2 .....	76

RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS PLANTEADAS.....	79
Respuestas del Tema: Un experimento - Desarrollo .....	79
Respuestas del Tema: Un experimento - Conclusiones.....	82
Respuestas del Tema: Juego de los siete errores .....	83
Respuestas del Tema: Apéndice II. Cómo construir las diferentes estructuras.....	85
Respuestas del Tema: Apéndice III. Otros polímeros .....	85

Espiando a los materiales

## PREFACIO

Este libro está escrito para las chicas y chicos que están en los últimos años de la escuela primaria y, por qué no, para aquéllas y aquéllos que están ya en el secundario (o lo han terminado) o, en fin, para aquéllas y aquéllos que sean curiosos. Y lo voy a comenzar haciéndoles un pedido a cada uno de los que se hayan propuesto leerlo:

Observando cuidadosamente el lugar en el que está leyendo, proponga respuestas a la siguiente pregunta: ¿Qué ocurriría si de ese lugar se sacaran los materiales cerámicos, los materiales poliméricos (los comúnmente llamados plásticos) y los materiales metálicos?

Como no conozco el lugar que ustedes han elegido para la lectura, y habrá tantos lugares como lectores, yo también la voy a contestar, observando la biblioteca en la que ahora estoy escribiendo.

**Si sacara los materiales cerámicos:** me quedaría sin las paredes, porque están construidas con ladrillos, cemento y cal.... Y también sin el techo. Y sin los vidrios de las ventanas. ¡Uy!, ¡Me quedaría al aire libre!

**Sacando los polímeros,** bueno, estoy cerca de un montón de objetos hechos con estos materiales. Pero.., a ver, desaparecería, cuanto menos, una parte del exterior de mi PC y también la mesa sobre la que está apoyada que es de madera (porque la madera también es un polímero; un polímero natural). Ay!, ¿y qué ocurriría con mi ropa? Porque las fibras de algodón y las fibras de seda son también polímeros naturales y las fibras de nailon y de LYCRA® son polímeros artificiales (no se encuentran en la naturaleza y son fabricados por el hombre). Y todas esas fibras textiles han sido usadas en la confección de mi ropa! Mejor no las miro!!! ¿Y mi nueva raqueta de fibra de carbono!?... Bueno, en realidad la fibra de carbono es un **material compuesto**.... Pero se obtiene embebiendo fibras de carbono en una resina. Y tanto las fibras de carbono como las resinas son también polímeros artificiales. Irremediablemente, la perdería.

**Si considero los metales:** me quedaría, entre otras cosas, sin los hilos de cobre de los cables de la PC, cuya parte exterior ya hubiera desaparecido al sacar los plásticos. Y

perdería también los metales que, junto con los materiales semiconductores, forman parte de los circuitos integrados (chips) que permiten que mi computadora funcione como funciona. En síntesis, me quedaría sin poder usar la PC! Además, mi silla se quedaría sin sus patas y mi piano sin sus cuerdas. Para mí, terrible!

¿Y qué nos muestran mis respuestas a la pregunta inicial que se planteó, junto con todas las diferentes respuestas que ustedes hayan podido dar? ¡Que los **materiales nos rodean!** Y que su **uso es indispensable en la vida diaria.**

Pero, además, y aunque indirectamente, estas respuestas nos indican que tenemos que saber **elegir el material adecuado para cada uso:** ¿Se imaginan lo que ocurriría si el material cerámico elegido para fabricar las baldosas para un piso fuera el material cerámico que se usa para fabricar los platos de cocina? ¡Las baldosas se romperían al muy poco tiempo de ser colocadas! O si se pusiera en la pierna de una persona una prótesis que estuviera fabricada con un metal que se doblara cuando la persona comienza a caminar!

Y porque **los materiales nos rodean,** porque son **indispensables en la vida diaria,** porque debemos **elegir el adecuado para cada uso,** no queda otra, **necesitamos conocerlos.** Pero ¿y qué podemos hacer para **conocer los materiales?** La respuesta es única: necesitamos **espiarlos para ver...: cómo son por dentro.** Y eso es lo que haremos a lo largo de las páginas de este libro. Por supuesto, será sólo el principio de un larguísimo camino aún abierto.

No les diré aquí los temas que estaremos tratando; es suficiente que se corran unas páginas y los lean en el índice. Si, por el contrario, haré unos pocos comentarios para adelantarles la forma en que se propone la lectura. **No serán ustedes lectores pasivos.** No; a lo largo del libro se proponen experimentos, se proponen preguntas y se dan las pautas para que puedan “construir” estructuras cristalinas. Hay un texto y hay apéndices a los que se aconseja dar una ojeada en el momento en que aparecen citados, aunque después se los lea con mayor cuidado. Y al final, las respuestas a las preguntas que se fueron planteando. Y como tienen que ir alternando entre texto, apéndices y experimentos, creo que la lectura del libro les resultará divertida, a pesar de la rigurosidad con que fue escrito.

Y ojalá que, además, y a través de este libro, algunos de ustedes puedan descubrir su vocación por la Ciencia, en particular por la fascinante Ciencia de los Materiales. Es por esto que, además de estar dedicado a aquéllos que, entre otros, hicieron al conocimiento de los metales y con quienes compartí actividades en el Centro Atómico Constituyentes (J.K., E.S. y J.G.), este libro está, también, dedicado a los lectores, que son el futuro.

Antes de dar por finalizado este Prefacio, y previendo que van a surgir, invito de antemano a cada lector a que me haga todos los comentarios, sugerencias y preguntas que desee a través del e-mail: [alicial.sarce@gmail.com](mailto:alicial.sarce@gmail.com)  
Serán muy bienvenidos y me va a encantar responderles.

Bueno. Ahora sí. **¡Empecemos ya a conocer a los materiales!**

Alicia Sarce

Espiando a los materiales

## LOS ÁTOMOS

Como yo sé que ustedes ya saben que todos los materiales están formados por partículas muy pequeñas: los **átomos**, agrego algunos comentarios. Según el material que se mire, esos átomos serán de un único tipo o de varios tipos, estarán unidos entre sí más o menos fuertemente y estarán distribuidos de una forma o de otra. Y es el tipo de átomos, la intensidad con que están unidos y su distribución, lo que determina muchas de las propiedades de los diferentes materiales y la forma en que estos se comportan.

Pero vayamos por partes: ¿qué quiere decir que los átomos son partículas muy pequeñas? En primer lugar, si decimos que son partículas, podemos **pensarlos** como esferitas. ¿Cuán pequeña es la esferita que **representa** un átomo? Para que tengan una idea, en la cabeza de un alfiler podrían ubicarse unas 40.000.000.000.000.000.000 esferitas o bien, unos 40.000.000.000.000.000.000 átomos! Para que no sean tan largos, cada uno de los números anteriores puede escribirse en la forma compacta:  $4 \times 10^{19}$ . Esta forma compacta indica que el número 4 está seguido de 19 ceros.

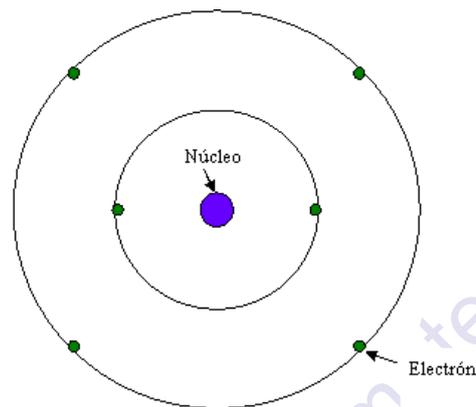
Pero los átomos no son las partículas más pequeñas de la materia. Están formados, a su vez, por otras aún más pequeñas, sobre las que seguramente también escucharon hablar: los **neutrones**, los **protones** y los **electrones**.

En el esquema de la figura 1a, que es la imagen habitualmente usada para representar un átomo, y en el detalle de la figura 1b, se muestra la ubicación de esas partículas (en particular, en el átomo de carbono). Como se ve:

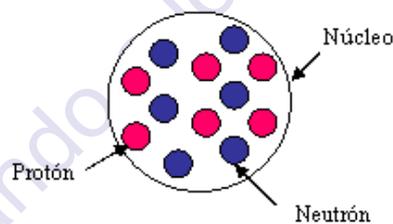
- Los neutrones y los protones se encuentran en la parte central de cada átomo, formando su **núcleo**.
- Los electrones, se encuentran alrededor de ese núcleo.

Algunos comentarios más sobre los protones, electrones y neutrones:

- Cada protón tiene una carga eléctrica positiva (+); cada electrón tiene una carga eléctrica negativa (-). Los neutrones no tienen carga, son neutros, de allí su nombre. Pero las tres partículas tienen masa.
- Si un átomo es neutro, es decir no es ni positivo ni negativo, el número de protones en el núcleo es igual al número de electrones que lo rodean.



a)



b)

Figura 1. a) Representación de un átomo de carbono; b) Detalle del núcleo

Aunque parezcan muchas cosas nuevas, permítanme un último comentario sobre este tema: **el número de protones en el núcleo de un átomo caracteriza a cada elemento químico de la naturaleza.** Así, por ejemplo, el elemento químico hidrógeno tiene un protón en su núcleo, mientras que el elemento químico carbono tiene 6 protones en su núcleo como se mostró en la figura 1b. El número de protones de un núcleo se denomina **número atómico** y los elementos pueden ordenarse por su número atómico creciente en la llamada Tabla Periódica de los Elementos.

Debe señalarse, sin embargo, que un mismo elemento químico puede estar formado por átomos diferentes: todos tienen en sus núcleos el mismo número de protones, pero pueden tener distinto el número de neutrones. Estos átomos de un elemento químico que tienen igual número de protones pero distinto número de neutrones se denominan **isótopos**, porque ocupan el mismo lugar en la Tabla Periódica (iso = igual; topo = lugar). Por ejemplo, el elemento carbono tiene tres isótopos naturales: el carbono 12 (con seis neutrones en su núcleo), el carbono 13 (con siete) y el carbono 14 (con ocho) y todos con seis protones en el núcleo. El carbono 12 es el más abundante en la naturaleza (98,89 %) aunque, probablemente, hayan oído hablar más del carbono 14, que es el usado para conocer la edad de muestras orgánicas de hasta casi 60.000 años.

Lo que acabamos de decir en el último párrafo, nos permitiría asemejar cada elemento químico a una familia. Los miembros que integran una familia tienen el mismo apellido, que identifica a esa familia. Sin embargo, cada uno de los miembros, tiene un nombre de pila distinto. Los átomos de un elemento químico tendrían también un apellido. En el ejemplo que hemos citado, este apellido sería Carbono y los integrantes de la familia que hemos mencionado son tres y tienen como nombres de pila: doce, trece y catorce. Por supuesto, estos nombres de pila de cada integrante de la familia carbono no pueden ser elegidos: si miran con cuidado se darán cuenta de que resultan siempre de sumar el número de protones (que para todos los integrantes de la familia Carbono es 6), y el número de neutrones que varía según el integrante.

Un átomo con más de 6 protones o menos de 6 protones pertenecería a otro elemento químico. Por ejemplo, si tuviera 7 protones formaría parte del elemento químico nitrógeno. Que tendría, entre otros, dos integrantes: el nitrógeno 14 y el nitrógeno 15. Estos dos integrantes del elemento químico nitrógeno, tienen el mismo número de neutrones que el carbono 13 y el carbono 14, respectivamente. Pero, como tienen distinto el número de protones, pertenecen a otro elemento químico, es decir a otra familia (la de apellido Nitrógeno). Así como las distintas familias tienen distinto el número de integrantes, los diferentes elementos químicos pueden tener distinto el número de isótopos.

En el **Apéndice I**, hacia el final del libro, encontrarán dibujos de algunos átomos neutros, otras pocas características más sobre ellos y una tabla en la que se indica el número de protones de los elementos que se mencionan en los temas que siguen (y algunos de sus isótopos naturales), para que puedan ir diferenciándolos. Les sugiero que den ahora una ojeada inicial a este Apéndice.

## **LOS MATERIALES CRISTALINOS**

Los **metales** y casi todas las **cerámicas** son **materiales cristalinos**. Por el contrario, prácticamente todos los **polímeros**, aquéllos materiales que comúnmente llamamos plásticos, son **materiales no cristalinos**.

Pero vayamos nuevamente por partes. ¿Qué significa que un material sea cristalino?

Para poder responder esta pregunta necesitamos “espiar” (usando Rayos X y/o potentes microscopios electrónicos) en el interior de los cristales, porque necesitamos conocer cómo están distribuidos en ellos los átomos. Espiemos, entonces, ¿qué es lo que se ve?:

que **los átomos dentro de los cristales están distribuidos con regularidad**

**geométrica**. Y es por eso que (afortunadamente) se puede usar la geometría para describir a los cristales. Por ejemplo, **si a temperatura ambiente** el cristal espiado fuera el hierro (que es un metal) se vería la distribución de átomos mostrada en la figura 2a. Si sobre esos átomos dibujáramos sucesivos cubos (como el que se muestra en la misma figura 2a), se encontraría que algunos átomos de hierro quedan ubicados sobre los vértices de los sucesivos cubos, mientras que cada uno de los restantes átomos queda ubicado en el centro de un cubo (figura 2b). Es por eso que se dice que el cristal de hierro tiene una **estructura cúbica de cuerpo centrado** y que puede ser descrito por una **celda cúbica de cuerpo centrado**, como la dibujada en la figura 2c, donde cada círculo representa la posición del centro de un átomo.

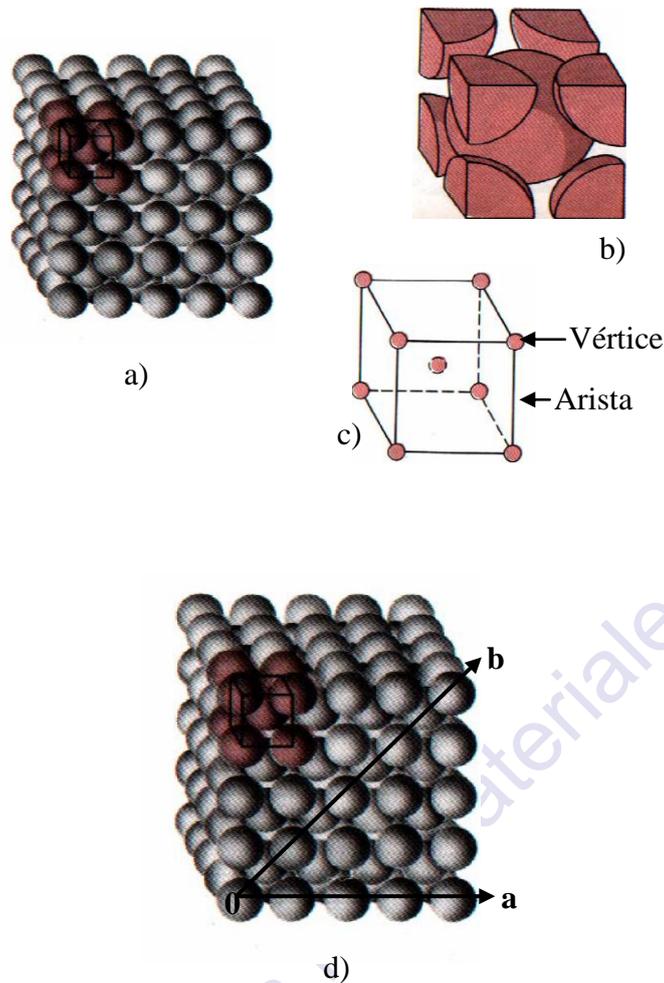


Figura 2. a) Representación de la distribución de los átomos en un cristal de hierro; b) Representación de la distribución de los átomos de hierro en el cubo marcado en a; c) Celda cúbica de cuerpo centrado; d) Direcciones **a** y **b** dentro del cristal trazadas a partir del origen **0**.

Fíjense la gran ayuda de la geometría: la distribución de los átomos en el cristal de hierro puede pensarse como una distribución de vértices y de centros de cubos contiguos, donde cada vértice y cada centro tiene asociado un átomo de hierro! Y fíjense otra cosa más: todo el cristal de hierro puede obtenerse trasladando una celda cúbica de cuerpo centrado en cada una de las tres direcciones del espacio (hacia arriba y hacia abajo; hacia la derecha y hacia la izquierda y hacia delante y hacia atrás del papel).

Además, si a partir de un origen (punto 0) se elige una dirección dentro del cristal determinada por una sucesión de átomos de hierro (la **a** o la **b** de la figura 2d, o cualquiera otra que se les ocurra), la analogía geométrica permite predecir que a lo largo de esa dirección los átomos estarán separados entre sí por la misma distancia. **Y ésa es la regularidad geométrica de la que hablamos en los cristales!**

Si en vez de espiar al hierro hubiéramos espiado, también a **temperatura ambiente**, el aluminio (que es también un metal), por supuesto también hubiéramos encontrado una regularidad geométrica en la distribución de los átomos de aluminio, aunque distinta de la encontrada en el hierro. La celda geométrica que permite describir al cristal de aluminio es **cúbica de caras centradas** (figura 3a) porque, como está mostrado en las figuras 3b y 3c, algunos de los átomos del cristal de aluminio resultarían ubicados en cada vértice de sucesivos cubos y los restantes en el centro de cada una de las caras de los cubos. La estructura del aluminio es, por ello, **cúbica de caras centradas**.

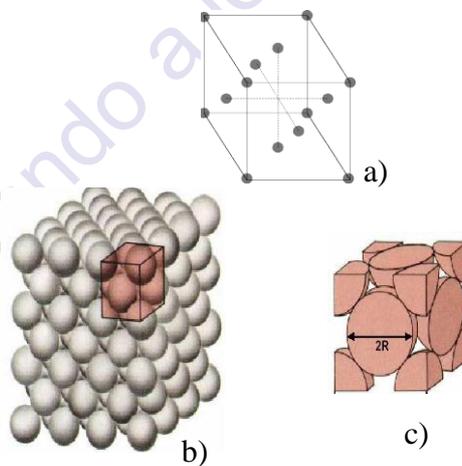


Figura 3. a) Celda cúbica de caras centradas; b) Representación de la distribución de los átomos en un cristal de aluminio; c) Representación de la distribución de los átomos en el cubo marcado en b).

En el **Apéndice II** (que también sugiero que le den ahora una ojeada) encontrarán ejemplos de la distribución de los átomos en otros metales. Y no sólo eso, también encontrarán las indicaciones para “construir” esas estructuras.

Ahora bien, si aceptaron la sugerencia de mirar el Apéndice II, tal vez les haya llamado la atención que cristales formados por diferentes átomos, como el plomo, la plata, el oro, el platino, el cobre y el níquel tengan también, al igual que el aluminio, una estructura cúbica de caras centradas. Cabe, entonces, la pregunta: ¿Esas estructuras son idénticas? ¿Coinciden las posiciones de todos los átomos de esos cristales? La respuesta es: **No**. La razón de este **no**: sobre una misma dirección, la separación entre dos átomos contiguos es distinta, según el cristal que se considere. Y esto vale para cualquier dirección elegida dentro del cristal. Esas diferencias en las separaciones de los átomos de los diferentes cristales, se ven reflejadas en el tamaño de las diferentes celdas cúbicas de caras centradas que los describen. De los cristales mencionados, la arista de la celda que describe al plomo es la de mayor tamaño y luego le siguen, en orden decreciente: la de la plata, la del oro, la del aluminio, la del platino, la del cobre y, finalmente, la del níquel (volver a mirar las Tablas del Apéndice II, (columna 2)).

Para los metales de estructura cúbica de cuerpo centrado mencionados en el Apéndice II, puede también hacerse un ordenamiento por el tamaño de las aristas de las celdas; en orden decreciente comenzaría con el sodio, que sería seguido por el tungsteno, el cromo y el hierro.

**Una observación muy importante:** los valores de los tamaños de celda dados en el Apéndice II, y que coinciden con las distancias entre los centros de dos átomos ubicados sobre una arista, son los que se miden a **temperatura ambiente**. Pero, como ustedes saben, al aumentar la temperatura los metales se **dilatan**. Eso significa que las distancias entre los átomos aumentan. Por lo tanto, si midiéramos a una temperatura

mayor, encontraríamos un tamaño de celda mayor; si lo hiciéramos a una temperatura menor, encontraríamos un tamaño menor. Estas variaciones, sin embargo, son pequeñas comparadas con los tamaños medidos. También los tamaños de las celdas dependen de la presión. Los valores dados son los medidos a la presión atmosférica normal. Si la presión sobre el material aumentara, ¿qué ocurriría con los tamaños de las celdas? Podrán ustedes responder fácilmente a esta pregunta después de “construir” las estructuras propuestas en el Apéndice II y realizar el experimento final allí sugerido.

## **LOS CRISTALES REALES NO SON PERFECTOS**

Se ha dicho anteriormente que los átomos dentro de los cristales están distribuidos con regularidad geométrica. Sin embargo, cuando se forman los cristales reales, se producen algunas irregularidades dentro de esa regularidad geométrica. Esas irregularidades son **defectos en los cristales**. Aquí solo mencionaremos dos tipos de defectos, simplemente para mostrar que, como se dice en el título de este párrafo, los cristales reales no son perfectos. El primero: las **vacancias**; el segundo: los **intersticiales**. ¿Qué es una vacancia? Es la ausencia de un átomo en la estructura cristalina. En la figura 4 se indica la posición de una vacancia. Y ¿qué es un intersticial? Bueno, la descripción también es muy simple: es un átomo ubicado fuera de su posición normal en la estructura cristalina. También está representado en la figura 4. Debe quedar claro que estas irregularidades constituyen solo una interrupción **muy localizada de la regularidad del conjunto de los átomos**. Y es por eso que se los llama defectos.

Los defectos juegan un papel muy importante en el **comportamiento** de los materiales cristalinos. Más adelante lo veremos en un ejemplo (en: Los átomos no están quietos).

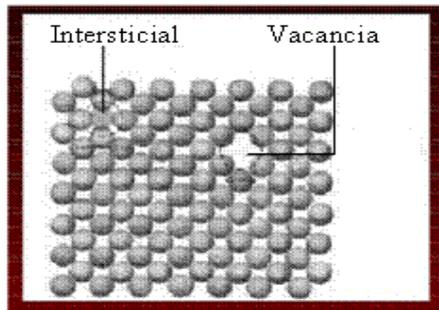


Figura 4. Representación de los defectos vacancia e intersticial.

## LOS MATERIALES NO CRISTALINOS

Con los ejemplos que se han dado de materiales cristalinos, va a resultar mucho más fácil entender de qué hablamos, cuando hablamos de materiales no cristalinos. Ya estamos en condiciones de predecir lo que se verá si los espiamos: **los átomos dentro del material no estarán distribuidos con regularidad geométrica.** Pero debemos ser cuidadosas/os con esto que acabamos de decir. Y para ver las cosas con cuidado, miraremos los polímeros que constituyen, como ya se dijo, un caso particular de estos materiales no cristalinos.

Para ir por partes, veamos primero el significado de la palabra polímero. Según el diccionario de la Real Academia Española, **poli** significa **muchos**. Polímero significa, entonces, muchos **meros**. Y ¿qué es un mero? Es, ni más ni menos, que un conjunto de átomos particulares unidos fuertemente entre sí. Si estos meros pueden unirse, además, fuertemente entre ellos, forman una larga **cadena**, como está esquematizado en la figura 5, donde cada círculo representa un mero. Y ¿el polímero?: no es más que el conjunto

de estas cadenas que, por lo general, se encuentran dobladas. La figura 6 es una representación de un tal polímero.

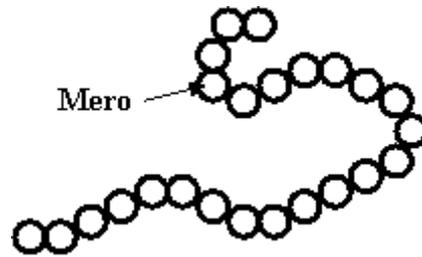


Figura 5. Esquema de la cadena de un polímero. Cada círculo representa la unidad que se repite (mero).

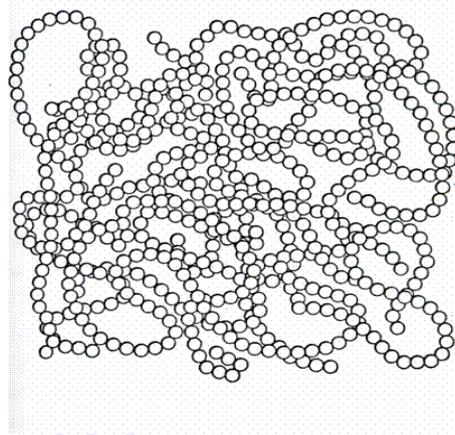


Figura 6. Representación esquemática de un polímero.

Todo muy fácil hasta acá pero, ¿cuáles son y cómo están ubicados los átomos que forman los meros, y que al unirse forman las cadenas del polímero? Elijamos un polímero particular: el **polietileno**, que ustedes conocen como material de bolsitas de supermercado. Un mero de polietileno está formado por seis átomos: dos átomos de carbono y cuatro átomos de hidrógeno y una cadena de polietileno, que es una repetición de estos meros, tiene la distribución de átomos que está mostrada en la figura

7.

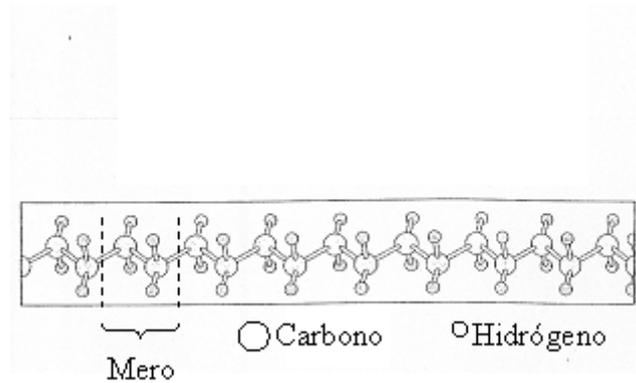


Figura 7. Representación de una cadena de polietileno.

Les pido ahora que, mirando nuevamente la cadena del polietileno, respondan esta nueva pregunta: ¿cómo es la distribución de los átomos dentro de la cadena: regular o irregular? Sí, efectivamente, al mirar con atención, se ve que la distribución es geoméricamente regular. Pero, entonces ¿por qué decimos que los polímeros son no cristalinos? A partir del esquema de la figura 6, la respuesta es muy fácil: porque, en general, en los polímeros, por lo menos una parte de las cadenas están dobladas sin ningún orden. Esto hace que la distribución geométrica del conjunto de todos los átomos del polímero no sea regular, como es requerido para que un material sea cristalino.

Puede ocurrir, sin embargo, que en algunas zonas del polímero, las cadenas sí estén plegadas en forma regular (ver la figura 8). Se forman así regiones ordenadas en las cuales los átomos sí tienen un orden geométrico. Estas regiones son zonas cristalinas dentro del polímero. El polímero es, entonces, una mezcla de regiones ordenadas o cristalinas y de regiones no ordenadas (llamadas amorfas). Como no son totalmente cristalinos se dice que, en general, los polímeros son materiales no cristalinos. El polietileno con que se fabrican las bolsas de supermercado tiene estas características.

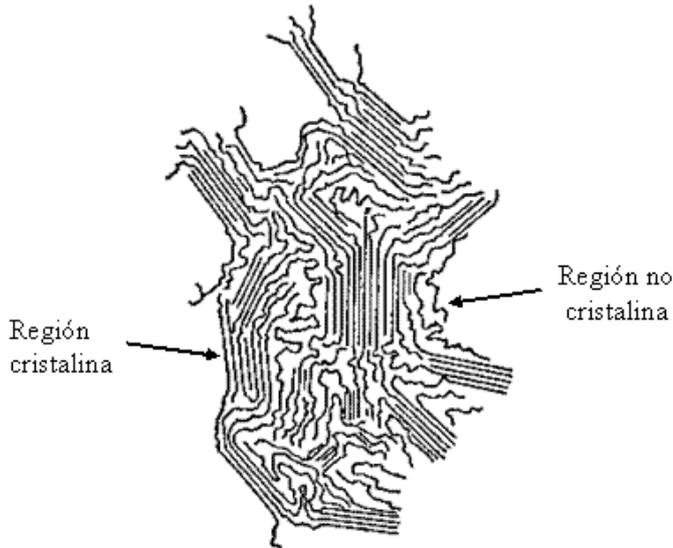


Figura 8. Regiones ordenadas (cristalinas) y desordenadas (amorfas) en un polímero.

Hay polímeros que son totalmente amorfos. Un ejemplo: el material con que se fabrican las banditas elásticas, que luego usaremos en un experimento.

En el **Apéndice III** se muestran las cadenas de algunos polímeros, para que puedan compararse con las del polietileno que hemos descrito.

## MATERIALES CERÁMICOS

(de lectura optativa)

¿Dónde los ubicamos? ¿Son cristales o no cristales? Me dirán por qué hago en este momento esta pregunta, si ya hemos dicho que casi en su totalidad son cristales. Bueno, primero para recordarlo. En segundo lugar, para mencionar un ejemplo de materiales cerámicos que no son cristalinos: los vidrios. Y tercero, para hacer una nueva pregunta ¿por qué, cuando hablamos de materiales cristalinos, no dimos ningún ejemplo de la distribución de los átomos en un material cerámico cristalino? La respuesta: porque la descripción de esta distribución es mucho más complicada que para el caso de los metales. Aún me parece que es mucho más complicada que la descripción para los

materiales no cristalinos. Por eso, de entrada les digo que pueden saltar este tema, porque no lo volveré a citar en este libro. Pero eso sí, su entendimiento constituye un desafío y yo, por eso, los apoyo si deciden aceptarlo. Me comprometo, además, a dar un solo ejemplo en un material que todos usamos desde que comenzamos a comer: la sal de cocina (cloruro de sodio).

El cloruro de sodio está formado por **iones de cloro** y por **iones de sodio**. Un ión de cloro es un átomo de cloro con un electrón de más, es decir con 18 electrones (ver cloro en Tabla I-1 del Apéndice I). El ión de cloro no es neutro. Tiene una carga negativa y su símbolo es  $\text{Cl}^-$ . Un ión de sodio es un átomo de sodio que cedió un electrón (el electrón que está solo en la última órbita, figura I 1b del Apéndice I). El ión de sodio tiene una carga positiva y su símbolo es  $\text{Na}^+$ . En el cristal, los iones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  están distribuidos en forma alternada como se muestra en la figura 9a. ¡Gran problema para describir geoméricamente esa distribución de iones a través de una celda! Pero intentémoslo con la ayuda de la figura 9b, donde los iones se representan por sus centros.

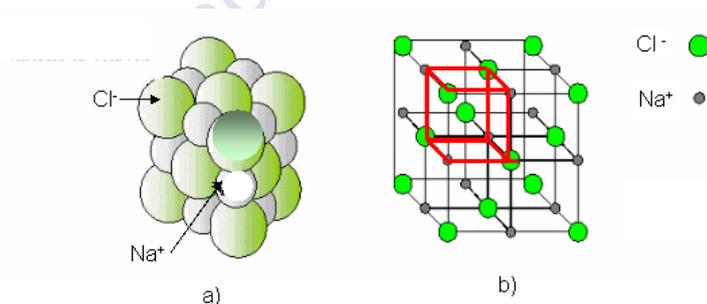


Figura 9. a) Distribución de los iones de cloro ( $\text{Cl}^-$ ) y sodio ( $\text{Na}^+$ ) en el cloruro de sodio ( $\text{ClNa}$ ); b) Representación de la distribución de los centros de los iones de cloro y sodio.

1- Al mirar las figuras 9a y 9b, la propuesta que seguramente les surge en forma inmediata es que podría ser descrita por una celda cúbica, como la dibujada en rojo. Pero veamos; al trasladar esta celda en las tres direcciones del espacio: ¿obtenemos el

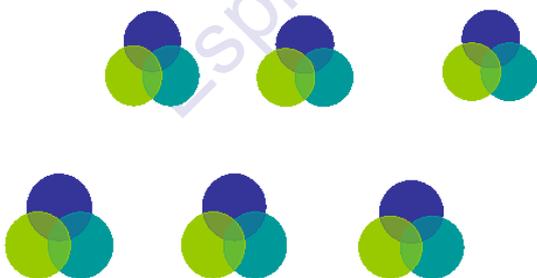
crystal de cloruro de sodio? Indudablemente, la respuesta es: **No**. Sobre la dirección de las aristas no quedarían alternados los iones cloro y sodio. Bueno, entonces, esta descripción geométrica no nos sirve para describir al cristal de cloruro de sodio.

Descartémosla.

2- Y, ¿entonces? ¿Qué **proponen los cristalógrafos**, que son los investigadores que estudian los cristales desde el punto de vista de la distribución geométrica de los átomos o iones, para describir el cloruro de sodio?

**La propuesta:** una celda cúbica de caras centradas donde cada vértice y cada centro de las caras tenga asociados dos iones: un ión cloro y un ión sodio.

Para entender esta propuesta de los cristalógrafos, vamos nosotros a construirnos un “cristal imaginario” en **2D** el cual, en vez de estar formado por átomos, esté formado por... ¡ramos de flores!, de tres flores cada uno, y distribuidos como está dibujado en la figura 10a. Aquí sí, una celda con forma de paralelogramo (figura 10b) describiría nuestro “cristal imaginario”. Cada ramo quedaría ubicado sobre cada uno de los vértices del paralelogramo. Así, cada vértice tendría asociado tres flores (**un motivo**) y no sólo una flor.



a)

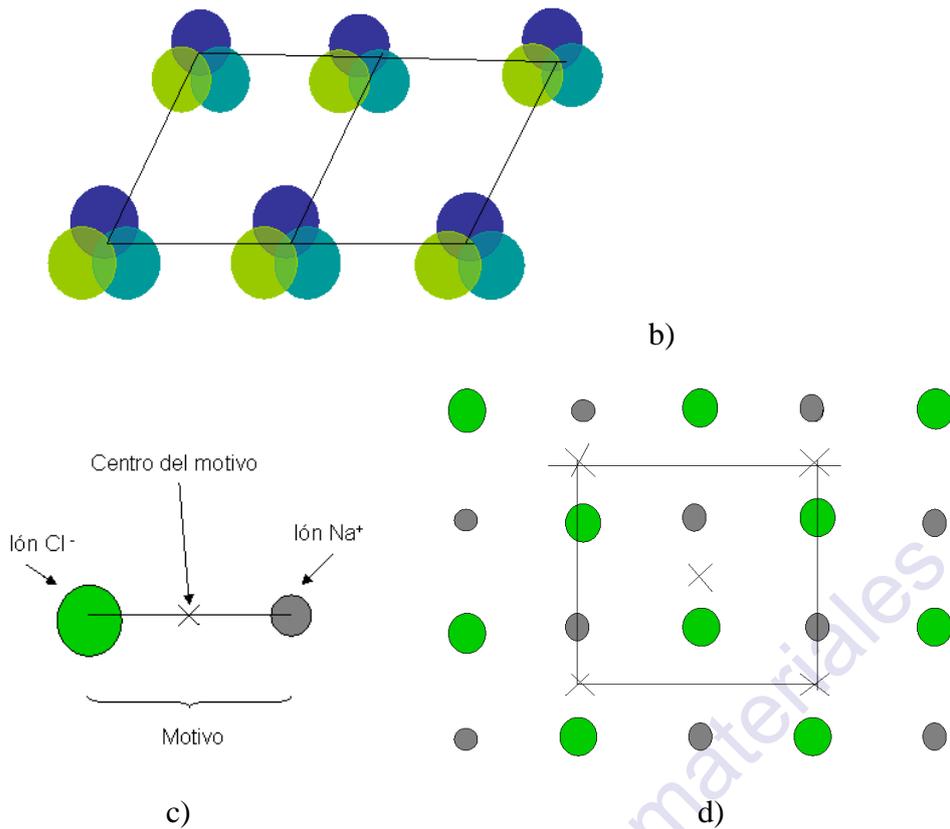


Figura 10. a) cristal “imaginario” (2D); b) Celdas tipo paralelogramo superpuestas al cristal “imaginario”; c) Motivo para la descripción del cloruro de sodio; d) Con cruces está representada la cara superior de la celda cúbica de caras centradas que describe al cloruro de sodio.

¿Y para qué nos sirve esto que acabamos de decir? Para poder pensar ahora nuestro cloruro de sodio en la misma forma en que lo piensan, y lo describen, los cristalógrafos: a través de una celda cúbica de caras centradas donde cada vértice y cada centro de las caras tiene asociado dos iones: un ión cloro y un ión sodio (tomados siempre en ese orden o, si lo prefieren un ión sodio y un ión cloro y manteniendo luego ese orden). Y ese par de iones constituye el **motivo** en nuestra celda (figura 10c). En la figura 10d se muestra solo una cara (para que sea más claro el dibujo) de la celda cúbica de caras centradas con el motivo, en la cual se hizo coincidir el centro de la distancia entre los

iones cloro y sodio con los vértices y con el centro de la cara. Es muy fácil construir la celda completa y ver que, trasladándola, se obtiene el cristal. Queda para ustedes como ejercicio.

Con este ejemplo no pueden quedar ya más dudas sobre la importancia de la geometría para la descripción de los cristales. Y voy más allá al decir, que todos los cristales pueden ser descritos por una celda geométrica adecuadamente elegida más un motivo. Y esta descripción es de gran importancia para poder realizar el estudio de las propiedades y del comportamiento de los materiales. En particular, en los metales que fueron considerados en páginas anteriores, el motivo está formado por un solo átomo. De hierro en el cristal de hierro; de aluminio en el cristal de aluminio.

## **UNIONES ENTRE LOS ÁTOMOS**

Los átomos que forman un sólido están unidos entre sí por fuerzas. Si no existieran estas fuerzas no tendríamos el sólido, tendríamos los átomos separados como en un gas. Pero esas fuerzas que mantienen los átomos unidos en un sólido son más o menos fuertes según el tipo de material y aún más, pueden ser de diferentes intensidades dentro de un mismo material.

Veamos primero qué pasa en los polímeros. Las uniones entre los átomos que están formando una cadena, como ya se dijo anteriormente, son muy fuertes. Así, en el polietileno (figura 7), cada átomo de carbono está unido muy fuertemente con otros dos átomos de carbono y también muy fuertemente con cada uno de los dos átomos de hidrógeno más cercanos. No es fácil romper una cadena. Por el contrario, en general, las fuerzas que unen las cadenas entre sí (porque también están unidas, si no fuera así, tampoco tendríamos el polímero) son débiles y pueden romperse fácilmente. En parte,

es lo que ocurre cuando estiramos una bolsita de supermercado (ver Un experimento). En el material con el que se fabrican las banditas elásticas, que es también un polímero, la situación es diferente. Hay algunos puntos en los que cadenas vecinas se unen fuertemente entre sí produciéndose los llamados enlaces cruzados (figura 11 a), que son los responsables de que puedan recuperar su tamaño inicial después de ser estiradas. Otro comentario más acerca de las uniones entre los átomos de un polímero. Si observan nuevamente la cadena de polietileno de la figura 7, seguramente les llamará la atención (tal vez ya lo habían notado) que no está dibujada en forma rectilínea, sino en zig-zag. Eso es así porque, además de ser fuertes, las uniones entre los átomos de una cadena se hacen según direcciones determinadas. Son **direccionales**.

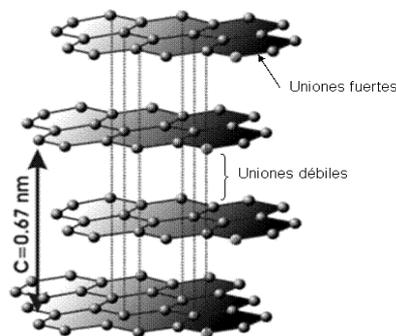


Figura 11. a) Enlaces cruzados entre cadenas; b) Distribución de los átomos de carbono en el grafito.

El caso de los metales es completamente distinto. Las fuerzas de unión se establecen en todas direcciones. Las uniones son **no direccionales**. Son fuertes, aunque no tan fuertes como las uniones entre los átomos de una cadena.

Por el contrario, en la mayoría de los materiales cerámicos todas las fuerzas de unión son muy fuertes, en algunos casos direccionales y en otros no direccionales. Pero como los materiales cerámicos, como ya vimos, son complejos, debemos decir que dentro de ellos encontramos también algunos ejemplos en los cuales coexisten uniones muy fuertes con uniones que no lo son tanto. Uno de esos ejemplos es el **grafito**, formado por átomos de carbono ubicados en distintas capas, como se muestra en la figura 11 b. En cada una de las capas los átomos están unidos entre sí muy fuertemente, formando hexágonos. Las uniones entre las capas son más débiles y pueden romperse fácilmente. **¡Por suerte!** Porque el grafito forma parte de las minas de los lápices. Al escribir rompemos las ligaduras débiles y algunas capas de grafito son las que quedan sobre el papel formando las letras y los números y los dibujos.

Ahora bien: ¿Por qué hablamos de estas fuerzas de unión entre los átomos en este libro? Porque ustedes van a tener que usar este concepto de fuerza entre átomos y cadenas de los polímeros, cuando tengan que explicar el porqué de los resultados del experimento que se propone más adelante. Y no podíamos dejar de hablar de las fuerzas entre los átomos de los otros materiales! Respecto del experimento, pueden adelantarse y hacerlo ya, si quieren. A mí me resulta entretenido! (ver **Un experimento**).

## **ESPIANDO CON EL MICROSCOPIO**

Hasta acá hemos espiado a los materiales usando como herramienta la imaginación. Así, hemos podido hablar de los átomos y pensar en su distribución dentro de ellos. Si bien actualmente hay microscopios, por ejemplo los **Microscopios electrónicos de**

**transmisión de alta resolución** o los microscopios de **Efecto Túnel** (ver Apéndice IV) que permiten ver los átomos de una superficie, la mayoría de los microscopios, ya sean **ópticos** o **electrónicos** (ver Apéndice IV), sólo nos permiten ver la **microestructura** de los materiales. Y ¿qué es la microestructura de un material? Es el interior de un material visto a través de un microscopio. Pero vayamos nuevamente, y como hasta ahora, por partes para entender qué es la microestructura porque, lo que acabamos de decir, no nos dice nada!. Para esto, y como solemos decir los investigadores, “supongamos” que tomamos una chapita de aluminio anodizado (a la que llamaremos **probeta** o **muestra** de aluminio anodizado) adecuadamente preparada y que, a **ojo desnudo** (a simple vista), se ve plateada y brillante. “Supongamos” que miramos su superficie a través de un microscopio óptico, con un aumento de 100x (se lee: 100 por). La figura 12 es una foto (micrografía) de la microestructura que veríamos. Es seguro que todos responderían correctamente si les pidiera que describan lo que se ve en la foto. Por supuesto, es muy fácil: un conjunto de figuras de distintos número de lados y distintos colores.

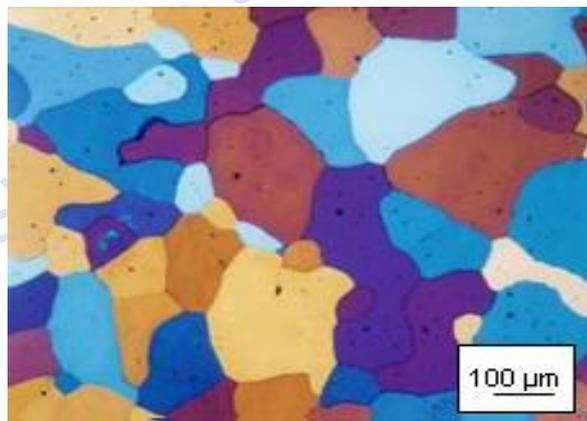
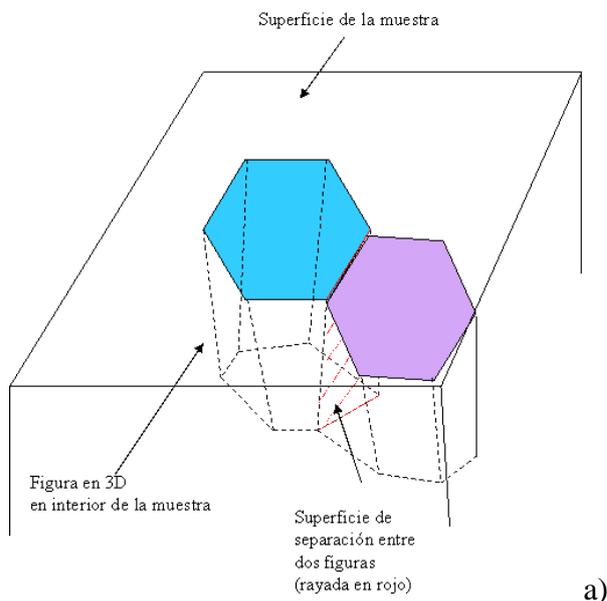


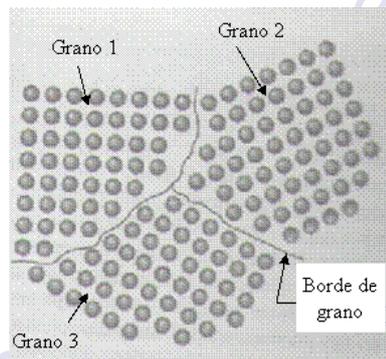
Figura 12. Micrografía de una chapa de aluminio anodizado obtenida con un microscopio óptico metalográfico. Atención Ricardo Montero.

Hasta ahí, perfecto, pero ¿qué son y por qué se ven estas figuras? Aquí van las respuestas a estas preguntas, que ya son más difíciles. Estas figuras resultan de la

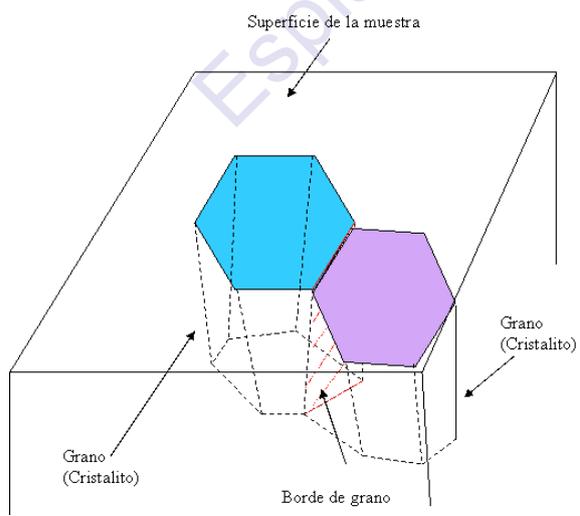
intersección de poliedros ubicados en el interior de la muestra (**3D**) con la superficie de la muestra (**2D**) (ver figura 13a).



a)



b)



c)

Figura 13. a) Intersección de dos poliedros ubicados en el interior de la muestra (3D) con la superficie de la muestra; b) Representación 2D de tres cristalitas (granos) con

diferentes orientaciones, separados por los bordes de grano; c) Representación 3D de dos granos y el borde de grano que los separa.

Estos poliedros tienen distinto número de caras, están ubicados dentro de la muestra uno junto a otro sin dejar espacios y están separados entre ellos por distintas superficies. Debemos, entonces, trasladar la pregunta inicial (en 2D) al espacio (3D): ¿por qué se forman estos poliedros dentro de la muestra y qué es, realmente, cada uno de estos poliedros? La respuesta: cada uno de estos poliedros es un cristalito de aluminio (y usamos el diminutivo porque son cristales muy pequeños). Esto significa que en cada uno de ellos, los átomos de aluminio están ubicados en los vértices y en los centros de las caras de sucesivas celdas cúbicas de caras centradas (ya saben por qué: porque el aluminio tiene una estructura cúbica de caras centradas). Y todas las celdas cúbicas de caras centradas de todos los poliedros son idénticas. Pero, entonces: ¿por qué se distingue un cristalito de otro y aparecen en la superficie de distintos colores? La respuesta: porque cada cristalito tiene una orientación diferente respecto de los cristalitos que lo rodean. En la figura 13b se ven los ángulos que forman las direcciones determinadas por la sucesión de átomos de un cristalito, con las direcciones determinadas por la sucesión de átomos de los cristalitos vecinos. Quedan así formadas superficies entre los cristalitos, sobre las cuales los átomos no siguen el orden de los átomos del cristalito 1 ni del cristalito 2. Los átomos allí están desordenados. A esas superficies de separación entre los cristalitos se les llama **borde de grano**. Y es el corte de los bordes de grano con la superficie de la muestra (ver nuevamente la figura 13a), lo que da origen a las figuras que se ven al microscopio. A cada uno de los cristalitos se los denomina **grano** (esto se representa en 2D en la figura 13 b y en la figura 13 c en 3D). Y ¿cómo se lo llamará a un material formado por la yuxtaposición de una enorme

cantidad de granos, es decir de una enorme cantidad de cristalitos? ¿Qué sufijo habrá que poner delante de la palabra cristal? Después de haber señalado por qué se llama polímero a los polímeros, es seguro que ya tendrán la respuesta. Sí, sin dudas:

### **policristal.**

En general, todos los materiales cristalinos son policristales y al mirarlos al microscopio se ven los granos y los bordes de grano.

Con todo lo que acabamos de analizar, podemos volver a mirar la micrografía del aluminio anodizado (figura 12), para prestar ahora atención al tamaño de los cristalitos que forman los granos y justificar el diminutivo usado. Es muy fácil determinar este tamaño. Es suficiente comparar las dimensiones de cada grano con el segmento que está en el pequeño recuadro de la foto. Pero antes, por supuesto, debemos saber qué indica ese segmento. Ese segmento de aproximadamente 1 cm, dibujado a la derecha y hacia abajo, sobre el que está escrito  $100\ \mu\text{m}$  ( $1\ \mu\text{m}$  (se lee micrón) es la milésima parte de un milímetro; es decir, 1 mm dividido en 1000 partes), indica el aumento con que se está viendo la microestructura. En este caso, indica que  $100\ \mu\text{m}$  en la muestra son vistos en la foto como aproximadamente 1 cm ( $1\ \text{cm} = 10^4\ \mu\text{m}$ ). Es decir, se ven amplificados. Es suficiente una regla de tres simple para averiguar  $1\ \mu\text{m}$  en la muestra a cuántos cm (o  $\mu\text{m}$ ) correspondería en la foto. Ese es el aumento con que se ve la microestructura. En el caso de la figura 12, y tal como se dijo, es de 100x. En los granos más grandes, el segmento dibujado entra unas 2,5 veces, por lo que cada uno de esos granos de la muestra mide unos  $250\ \mu\text{m}$  o, recordando que  $1\ \mu\text{m}$  es la milésima parte de un milímetro, a 0,25 mm. En los granos más pequeños, entra solo la mitad de este segmento; miden aproximadamente unos  $50\ \mu\text{m}$ . En general, los granos de los policristales tienen tamaños del orden de los 30 – 100 micrones.

Si volvemos a pensar en la cabeza de un alfiler, que ahora podemos decir que seguramente es un policristal de acero inoxidable, y suponemos que tanto la cabeza del alfiler como cada uno de los granos del policristal son esféricos y de tamaños de 1 mm ( $1000\ \mu\text{m}$ ) y de  $100\ \mu\text{m}$ , respectivamente, podemos responder a la pregunta: ¿cuántos granos habría en esa cabeza? Es muy fácil de obtener la respuesta; solo es necesario recordar cómo calcular el volumen de una esfera para poder calcular el volumen de la

cabeza y el volumen de un grano y hacer la división correspondiente. Y es seguro que han obtenido el resultado correcto: 1000 granos.

Y ahora sí, para terminar de espiar, ... ¿cómo se verá, en general, un polímero con sus partes cristalinas y sus partes amorfas, si se lo mira al microscopio? La figura 14, que es una micrografía (a 100x) de un polímero biodegradable parcialmente cristalino, da la respuesta. Las zonas circulares, llamadas esferulitas, son regiones en las que coexisten partes cristalinas y partes amorfas, es decir, regiones parcialmente cristalinas. Se distinguen claramente bordes rectos; son los límites entre esferulitas adyacentes. En estos polímeros la región totalmente amorfa es pequeña y prácticamente no aparece en la foto.

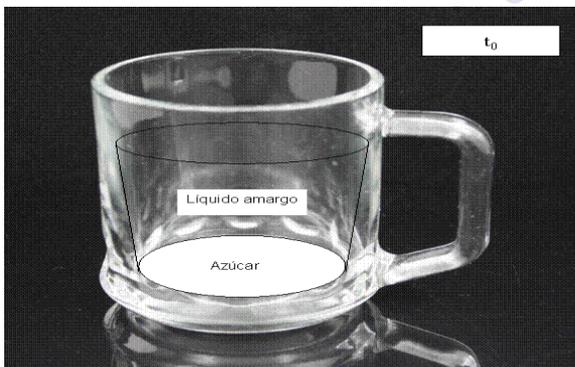


Figura 14. Micrografía de un polímero biodegradable visto al microscopio óptico. Las zonas circulares (esferulitas) son semicristalinas. Los bordes rectos son los límites entre esferulitas adyacentes. Se ven algunos pequeños agujeros producidos durante la preparación de la muestra. Tomada de la Tesis de Maestría “Propiedades viscoelásticas de polímeros biodegradables”, realizada por Vanesa Casariego bajo la dirección de la Dra. Elida B. Hermida. Presentada en el Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín – Comisión Nacional de Energía Atómica. Código IT IT/T-106/06.

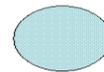
## LOS ÁTOMOS NO ESTÁN QUIETOS

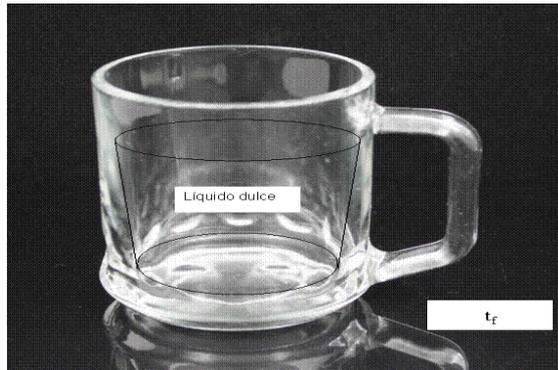
Prometo que haré muy pocos comentarios sobre este tema porque, aunque tengo la tentación de contarles muchas más cosas sobre el maravilloso mundo de los materiales, debo detenerme aquí si no quiero que éste se transforme en un libro de estudio. Queda, por otra parte, la posibilidad de continuarlo en un futuro volumen.

Empecemos con los comentarios: ¿Qué queremos decir cuando decimos “los átomos no están quietos”? Seguro que ustedes pueden responder a esta pregunta a partir de lo que observan, a diario, cuando a una taza con mate cocido, té, café, leche o agua (por qué no), le agregan algunas cucharitas de azúcar. Obviamente, como todos señalarán, en el instante inicial ( $t_0$ ) en el que las echan, el azúcar se acumula en la parte inferior de la taza (figura 15a). Si probamos el líquido de la parte superior lo encontraremos: amargo. Pero si volvemos a probarlo después de un tiempo (a  $t_f$ ) ya lo sentiremos: dulce. ¿Qué ha ocurrido? Si, la respuesta es simple: el azúcar, inicialmente toda en el fondo, se mueve (difunde) hasta quedar uniformemente distribuida (figura 15b) y todo el líquido queda con sabor dulce.



a)





b)

Figura 15. a) Azúcar depositada en el fondo de la taza en el instante inicial  $t_0$  en el que se echa en el líquido; b) Distribución uniforme del azúcar en el líquido en el tiempo final  $t_f$ .

En los sólidos también se pueden producir fenómenos similares a los descritos. Por ejemplo, si se ponen en contacto un cristal A (formado por átomos A y que tiene un cierto número de vacancias (recordar: una vacancia es la ausencia de un átomo en la estructura cristalina)) y un cristal B (formado por átomos B, también con un cierto número de vacancias), como está mostrado en la figura 16a, y el conjunto se lleva a una temperatura alta respecto a la temperatura ambiente, los átomos de A (inicialmente a la izquierda del plano P) se desplazarán hacia la derecha de ese plano, mientras que los átomos de B (inicialmente a la derecha del plano P) se desplazarán hacia la izquierda. El estado final (figura 16d), y si los materiales A y B pueden ser totalmente miscibles<sup>1</sup>, es una **solución sólida** homogénea (comparar las figuras 15a y 15b con las figuras 16a y 16d, respectivamente).

---

<sup>1</sup> Según el diccionario de la Real Academia Española: miscible = mezclable. El agua y la tinta son totalmente miscibles; el agua y el aceite, son inmiscibles.

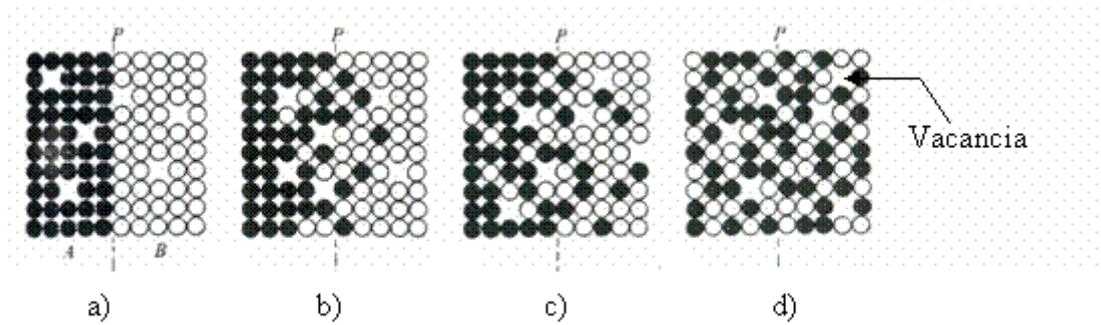


Figura 16. a) Distribución de átomos y vacancias en un cristal A y en un cristal B que están en contacto al tiempo  $t = t_0$ ; b) Distribución de los átomos y las vacancias a un tiempo  $t = t_1$  mayor que  $t_0$ ; c) *idem* a  $t = t_2$  mayor que  $t_1$ ; d) Solución sólida final a  $t = t_f$ .

Y ¿cómo se mueven los átomos de A y de B dentro de los sólidos, en el caso particular del ejemplo dado? A través de las sucesivas figuras 16, en las que se ve que las vacancias en A y B cambian su ubicación a medida que transcurre el tiempo, es posible reconstruir cómo se han ido desplazando los átomos hacia la derecha o hacia la izquierda: intercambiando sus posiciones con sucesivas vacancias vecinas.

Uno de estos intercambios se esquematiza en las figuras 17, donde un átomo marcado  $x$  pasa de su posición a la izquierda de los átomos 1 y 2 (figura 17a) a su posición a la derecha de los átomos 1 y 2 (figura 17c), inicialmente ocupada por una vacancia  $v$ .

Pero no cualquier átomo puede pasar de su posición inicial a una posición ocupada por una vacancia vecina. Solo pueden hacerlo aquéllos que tienen la energía suficiente para empujar hacia arriba y hacia abajo a los átomos cercanos como se muestra en la figura 17b. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es el número de átomos que tienen esa energía necesaria. A temperatura ambiente, prácticamente ninguno. Es por eso que, para conseguir la solución sólida homogénea de la figura 16d, el conjunto cristal A-cristal B debe llevarse a una temperatura alta.

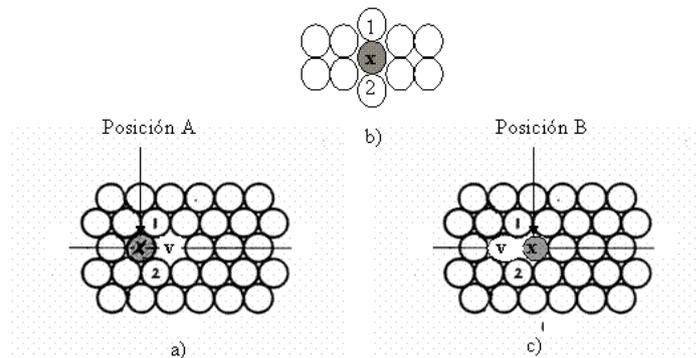


Figura 17. Movimiento de un átomo de la posición A a la posición B dentro de un cristal (Representación 2D). a) Posición inicial del átomo marcado **x** y la vacancia **v**; b) Posición intermedia de los átomos durante el salto; c) Posición final del átomo marcado **x** y de la vacancia **v**.

El ejemplo que acabamos de dar permite señalar un **punto importantísimo**: la importantísima importancia que la presencia de **los defectos** tiene en los fenómenos que se producen en los cristales. En este caso particular, los átomos han podido moverse, no estar quietos, porque existen las vacancias!

## UN EXPERIMENTO

Tal como lo anunciáramos en uno de los párrafos anteriores, va ahora la propuesta de un experimento (muy fácil de hacer). Les sugiero que lo realicen siguiendo los pasos que se detallan y que, a la vez, vayan contestando las preguntas que encuentren<sup>2</sup>.

### Objetivos del experimento:

<sup>2</sup> Las respuestas a las preguntas pueden verse al final del libro en: **Respuestas a las preguntas planteadas**.

- Observar y describir el comportamiento del polímero con el que se fabrica una bolsa de supermercado (lo más probable es que sea polietileno parcialmente cristalino), cuando se le aplican fuerzas. A un experimento de este tipo, en el que se aplican fuerzas a una muestra, se le llama **ensayo mecánico**. En particular, por la forma en que se aplicarán las fuerzas será un **ensayo mecánico de tracción**.
- Comparar el comportamiento de este material con el de una bandita elástica.

**Materiales:** Una bolsa de supermercado (polímero parcialmente cristalino) (figura 18a)

Una bandita elástica (polímero con enlaces cruzados)

**Muestras a usar:**

1. Tres tiras de aproximadamente 0,01 m (1 cm) de ancho y de 0,10 m (10 cm) de largo, cortadas en la dirección transversal de la bolsa, muestras **T** (ver figura 18b).
2. Una tira del mismo tamaño anterior, pero ahora cortada en la dirección longitudinal de la bolsa, muestra **L** (ver figura 18c).

(Nota: Puede ocurrir que se rompa una tira al iniciar el experimento. Es bastante frecuente, no hay que preocuparse y sólo es necesario tomar otra tira y volver a intentarlo. Por eso, pueden cortarse de entrada más muestras de cada dirección que las indicadas arriba).

3. Una bandita elástica.

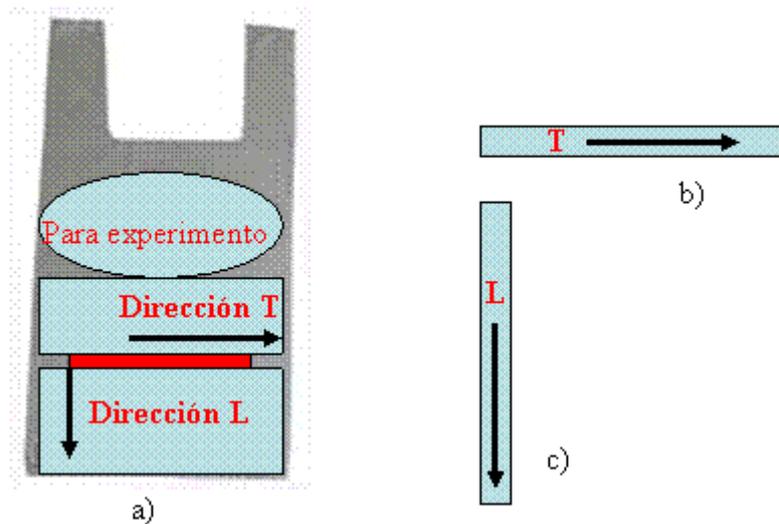


Figura 18. a) Bolsa de supermercado en la que se indican la dirección transversal (T) y la dirección longitudinal (L); b) Tira cortada en la dirección transversal (Muestra T); c) Tira cortada en la dirección longitudinal (Muestra L).

### Desarrollo:

a) En una de las muestras **T** aplicar las fuerzas  $F_1$  como está indicado en la figura 19a.

¿Qué se observa cuando se aplican esas fuerzas?

Si después de un tiempo  $t$ , y antes de que la muestra se rompa, deja de aplicar las fuerzas (suelta uno de sus extremos) ¿la longitud de muestra es mayor o menor que la longitud inicial?

b) Tomar la muestra **L**. Aplicar también las fuerzas  $F_1$  como está indicado en la figura 19b. ¿Qué se observa cuando se aplican las fuerzas?

¿En qué muestra, la **T** o la **L**, es necesario aplicar fuerzas mayores para obtener resultados equivalentes?

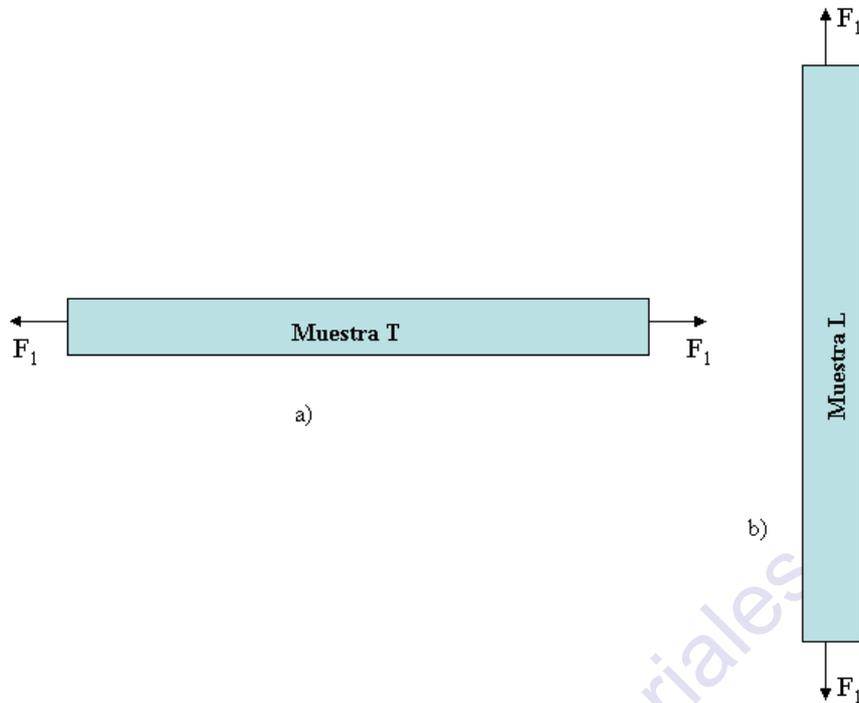


Figura 19. a) Fuerzas  $F_1$  aplicadas a la muestra T; b) Fuerzas  $F_1$  aplicadas a la muestra L

c) Tomar la segunda muestra **T**. Volver a aplicar fuerzas como las indicadas en a).

Describir cuidadosamente lo que observa. Prestar especial atención a la evolución del ancho de la muestra que se está ensayando.

d) Tomar la tercera muestra T. Volver a aplicar fuerzas como las indicadas en a).

Prestar ahora especial atención a la intensidad de las fuerzas que se aplican y responder los puntos 1, 2 y 3 que siguen.

1. Al iniciar el experimento, ¿es necesario aplicar fuerzas grandes?
2. ¿Qué ocurre finalmente cuando se aplican las fuerzas durante un tiempo suficientemente largo?
3. Finalizado el experimento, y aún aplicando fuerzas grandes a la muestra resultante, ¿se consigue un aumento de su longitud?

e) Tomar la bandita elástica y estirla. ¿Qué ocurre cuando suelta uno de sus extremos? Compare con lo que ocurría cuando ensayaba las tiras cortadas de la bolsa de supermercado.

**Nota:** Durante el desarrollo del experimento ustedes han ido observando qué le ocurría a las diferentes muestras, a medida que se iban ensayando. Las preguntas que debían responder estaban relacionadas, justamente, con esas observaciones. Pero finalizadas estas observaciones es necesario realizar **la discusión** de los resultados obtenidos, para responder a la pregunta importante que debe seguir a todo experimento: ¿por qué ocurre lo que se observa? En este caso en particular, y como se preguntaría un investigador del área de la Ciencia de los Materiales, nosotros deberíamos preguntarnos: ¿Qué está ocurriendo dentro del polímero para que, cuando se le aplican las fuerzas exteriores, se comporte como acabo de observar? Con lo que se vio en el punto **Materiales no cristalinos** podremos responder sin problemas esta pregunta. Sin embargo, antes de pasar al punto **Discusión**, les sugiero que comparen las respuestas que ustedes fueron dando hasta ahora con las que se presentan en el punto **Respuestas a las Preguntas Planteadas – Respuestas del Tema: Un experimento - Desarrollo**. Seguro que coinciden!

## **Discusión**

Previamente, recordemos que antes de aplicar las fuerzas:

- El polímero de las muestras de la bolsa de supermercado es parcialmente cristalino (tiene regiones cristalinas y regiones amorfas). En las regiones amorfas las cadenas del polímero están dobladas sin ningún orden (figura 6). En las regiones cristalinas las cadenas están plegadas en forma regular (figura 8).

- Las fuerzas que mantienen unidas las cadenas entre sí son débiles.
- El polímero de las banditas elásticas es amorfo y hay enlaces cruzados que unen las cadenas fuertemente entre sí (figura 11a).

Ahora sí!, pasemos a discutir los resultados.

Al aplicar las fuerzas exteriores a las muestras de la bolsa de supermercado, se rompen las uniones débiles y se produce un fuerte rearrreglo de las cadenas del polímero, lo que lleva a la formación del primer cuello observado. Durante un tiempo, el alargamiento de la muestra se produce en esa zona. Junto con este alargamiento, en esta región del cuello las cadenas se orientan en la dirección de las fuerzas aplicadas (como se muestra en la figura 20). Debido a este alineamiento, aumenta el volumen de zonas cristalinas. Esto hace que el cuello se vuelva más resistente y que no pueda seguir deformándose aún cuando se sigan aplicando las fuerzas.



Figura 20. Rearreglo de las cadenas en la región del cuello.

El alargamiento comienza, entonces, en otra parte de la muestra con la formación de un nuevo cuello y así sucesivamente, hasta que la muestra resultante queda más larga, más angosta y más resistente que la inicial. Esta descripción permite entender por qué, aún aplicando fuerzas grandes a la muestra final, no se puede conseguir un mayor alargamiento. Es muy resistente. Finalmente, la muestra se rompe.

¿Qué ocurre en el material de la bandita elástica al aplicar las fuerzas? Las ligaduras fuertes que hay entre las cadenas no permiten que se produzca un desplazamiento entre

ellas. Sólo pueden desdoblarse. Al quitar las fuerzas vuelven a doblarse, llevando a las banditas a su tamaño inicial. Por esta razón, a diferencia de las muestras anteriores, no presentan deformación plástica; la deformación es solo elástica.

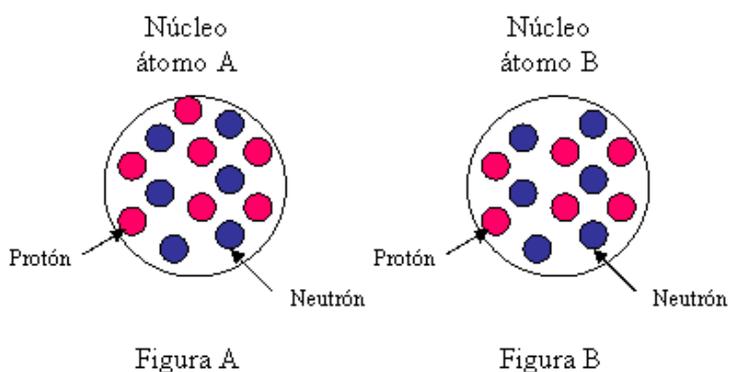
## Conclusiones

En general, todo trabajo científico termina con una o más conclusiones. Aunque el que se acaba de hacer es un experimento y no un trabajo científico, propongo incluir como conclusión del mismo la respuesta a la siguiente pregunta: ¿Sería más o menos útil la bolsa de supermercado, si al fabricarla se invirtieran las direcciones **T** y **L**, mostradas anteriormente en la figura 18? Piensen en la nueva bolsa cargada con varias botellas (es más o menos equivalente a aplicar las fuerzas esquematizadas en las figuras 19).

## JUEGO DE LOS SIETE ERRORES

Señale los errores que encuentre en las afirmaciones siguientes (Sugerencia: buscarlos después de haber leído los Apéndices. Ver las respuestas al final en: **Respuestas a las preguntas planteadas** – Respuestas del Tema: Juego de los siete errores).

1- Las figuras A y B representan los núcleos de dos átomos (A y B) de un mismo elemento (ver tema: Los Átomos).



2- La figura C representa la distribución de los átomos en una dirección **a** dentro de un cristal (ver tema: Los Materiales cristalinos).



Figura C

3- La estructura del cristal descrito por la celda que está dibujada en la figura D es cúbica de caras centradas (ver tema: Los materiales cristalinos).

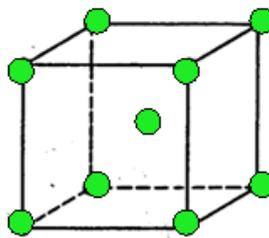


Figura D

4- Un microscopio óptico tiene un objetivo de 100x y un ocular de 10x. El aumento con el que se observa es de 300x (ver Apéndice IV).

5- La foto de la figura E (obtenida en un microscopio óptico) muestra la microestructura de una chapa de aluminio, que se pulió mecánicamente con los papeles de esmeril 220, 320, 400 y 600 (ver Apéndice V).

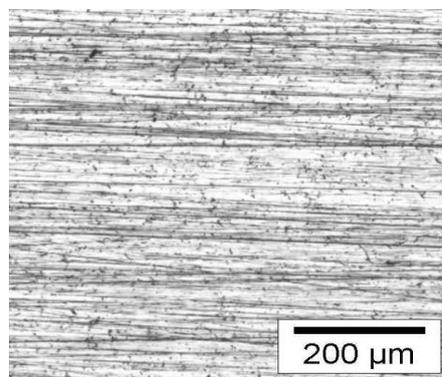


Figura E

6- Los policristales de las muestras M y N de la figura F tienen igual tamaño de grano (ver tema: Espiando con el microscopio).

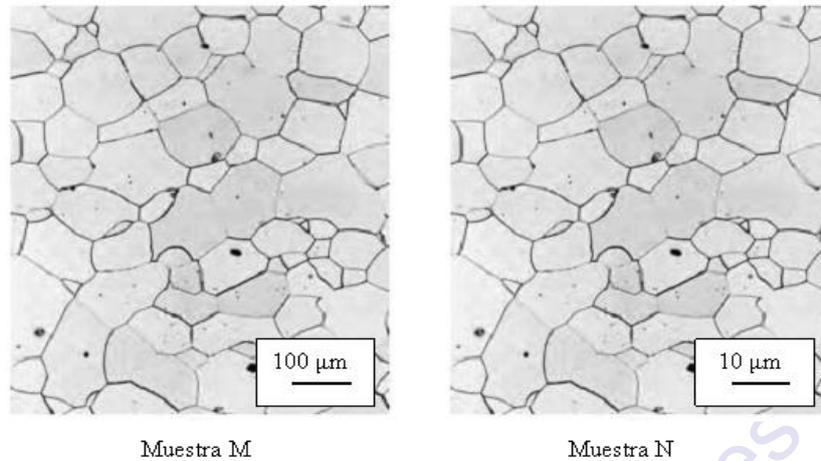


Figura F

7- Una vacancia de un cristal puede ser observada en un microscopio óptico metalográfico (ver tema: Los cristales reales no son perfectos y los Apéndices II y IV).

## EPÍLOGO

### ¿Qué significa medir?

El tema que consideraremos en este Epílogo va más allá del estudio de los materiales ya que es válido para el resultado de cualquier medición que se haga de cualquier magnitud<sup>3</sup>. Es por eso que podrá parecerles que está desligado de todo lo que anteriormente estuvimos viendo. Sin embargo, en realidad, está íntimamente **relacionado** con el objetivo de nuestro libro que es conocer a los materiales dado que, para conocer a los materiales, es necesario hacer mediciones: para caracterizarlos, para conocer sus propiedades, para determinar valores relacionados con su comportamiento.

---

<sup>3</sup> Magnitud = propiedad física que puede ser medida; p. ej., la temperatura, el peso, etc. (Diccionario de la Real Academia Española)

Aunque importantísimo, el tema no es fácil de tratar. Por eso este Epílogo está dividido en Parte 1 y Parte 2. La Parte 1 es más accesible (y más divertida, porque incluye un experimento). La Parte 2, que está casi al final del libro como **Apéndice VI**, es más complicada y pueden ustedes no leerla ahora y dejarla para cuando estén más avanzados en los estudios. O para cuando tengan más ganas! Por el momento, comencemos con la:

### Parte 1

A ver..., veamos, tratemos de responder a la pregunta del título: ¿qué significa medir, por ejemplo, medir la temperatura de un cuerpo A o el peso de un cuerpo B? Medir la temperatura significa: tomar, por ejemplo, un termómetro; ponerlo en contacto con el cuerpo A; esperar un cierto tiempo y medir luego la longitud de la columna de mercurio del termómetro. Medir el peso de un cuerpo B significa, bueno ustedes ya lo saben: tomar el cuerpo B; ponerlo sobre una balanza y leer el valor que se indica sobre la escala graduada de la balanza.

El resultado del proceso de una medición es, entonces, un número. Si se repitiera una medición varias veces, por ejemplo si se repitiera varias veces la medida del peso del cuerpo B, se esperaría que los resultados fueran coincidentes. **En general, esto no sucede.** Los números que se obtienen en mediciones consecutivas suelen no coincidir.

Como en este libro los lectores son lectores activos, los invito a hacer el **Experimento del Epílogo** (que yo hice cuando hice mi primera materia de Física con un magnífico docente, investigador y consumado organista, el Dr. Juan Roederer). Así podrán verificar que, efectivamente, los números que se obtienen en mediciones consecutivas de una magnitud son, en general, diferentes.

## EXPERIMENTO DEL EPÍLOGO

**Objetivo del experimento:** Medir el tamaño (la longitud) de una mesa.

**Materiales:**

- Una mesa.
- Una regla corta respecto de la longitud de la mesa a medir (regla l, figura 21 b).
- Una regla más corta que la anterior (regla p, figura 21 c; la pueden fabricar ustedes con un cartón sobre el que marcan divisiones iguales a las de la regla l).
- Una cinta métrica (figura 21 a).
- Cuatro tablas para ir anotando los resultados de las medidas, que se numerarán 1, 2, 3 y 4 y corresponderán a los Experimentos 1, 2, 3 y 4 respectivamente. Ver como ejemplo la TABLA 1 (Experimento 1).

TABLA 1 (Experimento 1)

Medida	Valor medido (cm)
1	A1
2	A2
3	A3
4	A4
5	A5
6	A6
7	A7
8	A8
9	A9
10	A10
11	A11
12	A12



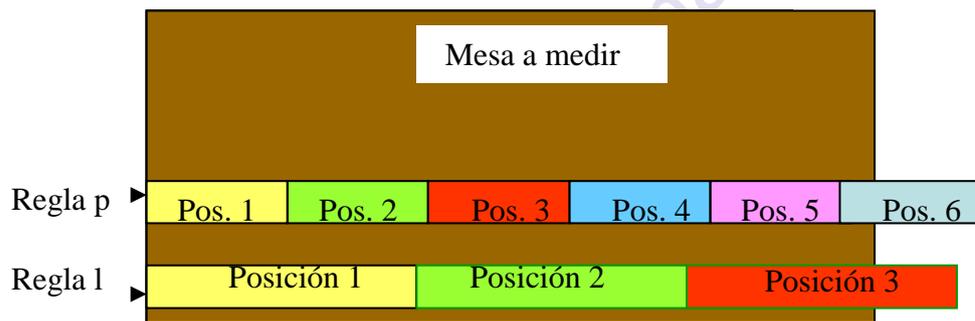
a) Cinta métrica



b) Regla l



c) Regla p



d)

Figura 21. a), b) y c) Cinta métrica y reglas usadas para medir. d) Sucesivas posiciones de las reglas para medir la mesa. Cada color indica la regla ubicada en una posición.

## Desarrollo

Experimento 1: medir cuidadosamente la longitud de la mesa usando la regla l.

i- Tomar la regla l y transportarla **cuidadosamente** sobre la mesa sucesivas veces, haciendo coincidir el cero de la regla con el final de la regla ubicada en la posición

anterior (ver figura 21 d). Anotar el número obtenido que indica la longitud de la mesa en el primer casillero libre de la columna “Valor medido” de la TABLA 1 (indicado A1).

ii- Repetir lo anterior **hasta completar 12 mediciones de la mesa** (sí, doce), **no olvidando** de anotar cada uno de los sucesivos resultados obtenidos en los casilleros correspondientes (indicados A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10, A11, A12) de la misma TABLA 1.

Experimento 2: medir rápidamente la longitud de la mesa usando la regla l.

Hacer lo indicado en los puntos i e ii pero ahora transportando la regla l **más rápidamente**, es decir, sin tener mayores cuidados en hacer coincidir el cero de la regla con el final de la regla ubicada en la posición anterior (volcar los resultados en la Tabla 2).

Experimento 3: medir cuidadosamente la longitud de la mesa usando la regla p.

Repetir el Experimento 1 con la regla más pequeña p (usar Tabla 3).

Experimento 4: medir cuidadosamente la longitud de la mesa usando la cinta métrica.

Repetir el experimento 1 usando la cinta métrica (volcar en Tabla 4).

Observación: Mirar detenidamente los resultados obtenidos en los sucesivos experimentos 1, 2, 3 y 4 para poder analizarlos.

### **Análisis de los Resultados**

Leer lo que sigue y tachar lo que no corresponda.

#### Experimento 1

Los resultados de las 12 sucesivas mediciones de la mesa realizadas transportando cuidadosamente la regla l, *son / no son* coincidentes.

### Experimento 2

Los resultados de las sucesivas mediciones de la mesa realizadas transportando la regla l más rápidamente que en el Experimento 1, *son / no son* coincidentes.

Los resultados difieren más entre sí (tienen mayor fluctuación) cuando el transporte de la regla l se realiza *cuidadosamente / rápidamente*.

### Experimento 3

Los resultados de las sucesivas mediciones de la mesa realizadas transportando cuidadosamente la regla p, *son / no son* coincidentes.

Comparando los resultados del Experimento 1 (transporte cuidadoso de la regla l) y del Experimento 3 (transporte cuidadoso la regla p) se observa *mayor / menor* fluctuación entre los resultados del Experimento 3.

### Experimento 4

Los resultados de cada una de las 12 mediciones de la mesa realizadas con la cinta métrica *son / no son* coincidentes.

Los resultados obtenidos al medir la mesa con la cinta métrica difieren entre sí *más / menos* que los resultados obtenidos usando las reglas l o p.

## **Discusión**

En esta sección se discuten las respuestas a las opciones planteadas en el punto anterior.

Experimento 1. Los resultados obtenidos en las 12 mediciones de la mesa realizadas con la regla l seguramente *no son* coincidentes. Esto se debe a que, por más cuidado que se tenga, en el proceso de transportar la regla se cometen inevitablemente errores mecánicos. Estos errores se deben, fundamentalmente, a que es difícil ubicar

exactamente el inicio de la regla justo donde estaba la parte final de ella en la posición anterior.

Experimento 2. Los resultados obtenidos *no son* coincidentes. Además, al transportar la regla *rápidamente*, es aún más difícil ubicarla correctamente en las sucesivas posiciones. Por ello los errores mecánicos que se cometen son mayores. Y la fluctuación de los resultados es mayor.

Experimento 3. Los resultados *no son* coincidentes. Con lo dicho anteriormente, por otra parte, es muy fácil explicar por qué la fluctuación *es mayor* cuando se usa la regla más pequeña aún cuando su transporte se haya hecho cuidadosamente: porque es necesario transportarla más veces que a la regla l y cada vez que se transporta se comete un error mecánico.

Experimento 4. Los 12 valores de la longitud de la mesa medidos con la cinta métrica *no son* coincidentes. Sin embargo, si la cinta métrica es igual o más larga que la mesa y se puede medir cuidadosamente sin necesidad de transportarla, seguramente las doce mediciones dan resultados muy cercanos. La pequeña dispersión está asociada, en este caso, a que no todas las veces es posible ubicar el cero de la cinta exactamente en el inicio de la mesa, más allá de posibles errores en la lectura del valor obtenido. Si la cinta métrica usada es un poco más corta que la mesa, también la dispersión será pequeña porque no es necesario transportarla más de una vez. Por eso, los resultados difieren *menos* entre sí que cuando se usan las reglas l o p.

Bueno, entonces, y en general, se habrán obtenido 12 valores distintos para la longitud de la mesa en cada uno de los experimentos 1, 2, 3 y 4 realizados. Y, ¿qué podemos hacer con esos doce valores de la longitud de la mesa que hemos medido en cada caso, cuando sabemos que la longitud de la mesa tiene, en realidad, un **único valor numérico**

**verdadero?** Esos doce valores medidos se pueden usar para **fabricar** (como proponía Roederer) un **único valor**, que esté lo más **cerca** posible del **valor verdadero**.

El valor que puede **fabricarse** y que está lo más **cerca** posible del valor verdadero, y que por eso se lo puede llamar **valor más probable** (o valor más razonable), es el **promedio aritmético de los valores medidos**. Este promedio aritmético (seguro que ustedes ya lo saben) es la suma de todos los valores medidos en cada experimento dividido por el número de medidas realizadas. Si, por ejemplo, A1 es el resultado de la primera medición en el experimento 1; A2 el de la segunda medición en el mismo experimento 1; A3 el de la tercera; A4 el de la cuarta; A5 el de la quinta; A6 el de la sexta; A7 el de la séptima; A8 el de la octava; A9 el de la novena; A10 el de la décima; A11 el de la undécima y A12 el de la duodécima medición, el promedio  $\bar{A}$  es:

$$\bar{A} = \frac{A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6 + A7 + A8 + A9 + A10 + A11 + A12}{12} \quad (1)$$

Nota: Recordar que en la fórmula anterior debe hacerse primero la suma que figura en el numerador de la fracción y el resultado es el que se divide por 12.

Propuesta:

Calcular el valor más probable (promedio aritmético) de la longitud de la mesa, usando:

i) los resultados del Experimento 1; ii) los resultados del Experimento 3 y iii) los resultados del Experimento 4. ¿Coinciden los tres valores del promedio aritmético que se obtienen?

Con la certeza de que después de hacer los tres promedios han respondido la pregunta anterior con un **No**, hago un importantísimo comentario: si hubieran medido la mesa cien veces (pueden hacerlo, si quieren!) en vez de las doce veces propuestas, verían que

los promedios que se calculan para cada experimento se acercan más entre sí. Esto es porque, a medida que **aumenta el número de mediciones N**, el valor del promedio ( $\bar{A}$ ) se acerca más al valor verdadero de la magnitud que se mide.

Si se corren ahora hasta el APÉNDICE II al que ya seguramente le dieron una ojeada, encontrarán las TABLAS II-1a y II-1b en las que se presentan los tamaños de diferentes celdas geométricas. Esos tamaños dados, son valores medios calculados a partir de los diferentes resultados obtenidos en distintas mediciones realizadas en distintos laboratorios. Como esas mediciones son muy precisas, los números que se obtienen en cada una de ellas difieren muy poco entre sí.

## APÉNDICE I

### Representación de los átomos

El modelo más sencillo que se puede adoptar para describir el átomo (y con el que nos quedaremos) es el dado en el inicio de este libro, que surgió a partir de los trabajos

**Ernest Rutherford**<sup>4</sup> y **Niels Henrik David Böhr**<sup>5</sup>: Los átomos están formados por un núcleo, alrededor del cual se encuentran los electrones.<sup>6</sup>

El núcleo de los átomos es muy pequeño: ocupa una esfera de radio de 0,000000000000001 m. En cambio, el átomo entero, incluyendo los electrones, ocupa

---

<sup>4</sup> **Ernest Rutherford**: Conocido también como Lord Rutherford. Físico y químico que nació en Nueva Zelanda en 1871 y murió en 1937. Ganó el premio Nobel de Química en 1908.

<sup>5</sup> **Niels Henrik David Böhr**: Físico nacido en Dinamarca en 1885 que falleció en 1962. Fue alumno de Rutherford y recibió el premio Nobel de Física en 1922.

<sup>6</sup> Una descripción actual puede leerse en el excelente trabajo de divulgación: “The Higgs Boson: Is the End in Sight?” escrito por Don Lincoln, investigador superior en el Fermi National Accelerator Laboratory (FERMILAB) de Estados Unidos de Norteamérica. Publicado en: The physics teacher, Vol 50, septiembre 2012. (<http://tpt.aapt.org>).

una esfera de radio  $0,0000000001 \text{ m}^7$ . Así, si dibujáramos al núcleo con un radio de 1 mm, deberíamos dibujar el átomo completo con un radio de 10.000 mm (10 m!).

Sin embargo, aunque el núcleo es muy pequeño, prácticamente todo el peso del átomo se concentra en él. Por ejemplo, el núcleo del átomo de hidrógeno (figura I 1a) que está formado por un protón (es el único átomo que no tiene neutrones en su núcleo), pesa  $1,67 \times 10^{-24}$  gramos, mientras que el único electrón que posee pesa  $0,91 \times 10^{-27}$  gramos. A continuación se muestran diferentes representaciones gráficas sencillas de los átomos hidrógeno, sodio, aluminio y hierro (figuras I 1), y en la Tabla I-1, que está más abajo, se indica el número de protones (igual al de electrones, si los átomos son neutros) de todos los átomos que se mencionan en el libro.

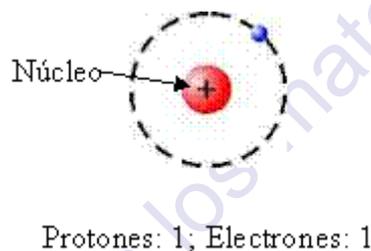


Figura I 1a. Representación del átomo de hidrógeno

---

<sup>7</sup> Para que no sean tan largos, cada uno de los números decimales anteriores puede escribirse en la forma compacta:  $10^{-14}$  para el radio del núcleo y  $10^{-10}$  para el radio del átomo. El signo menos delante del número 14 indica hay 14 números después de la coma decimal y el signo menos delante del 10 que hay 10 números después de la coma decimal.

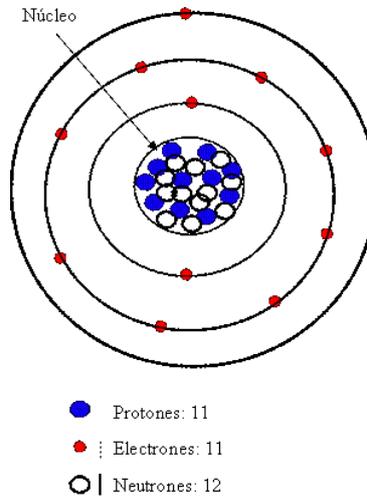


Figura I 1b. Representación de un átomo neutro de sodio.

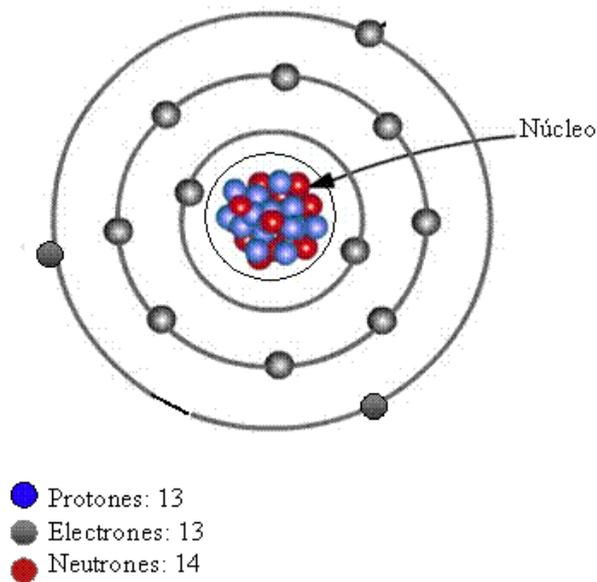
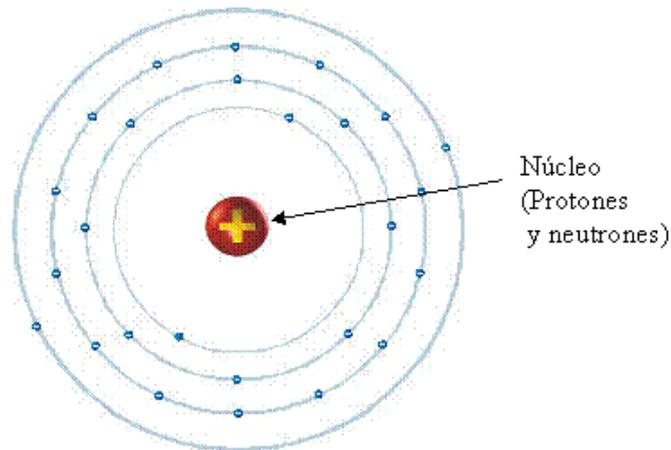


Figura I 1c. Representación de un átomo neutro de aluminio



Protones: 26  
 Electrones: 26  
 Neutrones: 29

Figura I 1d. Representación de un átomo neutro de hierro

Un comentario a partir de la representación de los átomos de hidrógeno, sodio, aluminio, hierro y carbono (figura 1). En todas ellas se dibuja el núcleo pequeño y los electrones se dibujan alrededor de ese núcleo, según la descripción de Rutherford y Böhr. Pero los electrones no se dibujan en una posición cualquiera, sino ocupando órbitas; es una representación similar a la que se hace de los planetas alrededor del sol. Esta representación está de acuerdo con descripciones más cuidadosas del átomo realizadas también por Bohr que indican que: los electrones de los átomos solo pueden moverse en ciertas órbitas de determinados radios. Cada órbita está asociada con una dada energía. Los electrones que se encuentran en una misma órbita poseen energías muy parecidas, aunque no iguales, ya que dentro de un átomo no puede haber dos electrones que tengan exactamente la misma energía. Uy! Qué complicado se está poniendo esto! Pero no se asusten, no seguiremos adelante en la descripción del átomo, se puede consultar más en la bibliografía. Sólo agregaremos que el número de órbitas y el número de electrones que hay en cada una depende del tipo de átomo. Es suficiente

volver a mirar los dibujos anteriores para verificarlo, y/o buscar en Internet el dibujo de otros átomos.

Pasemos, entonces, a la **Tabla I-1** que identifica (dando el número de protones, por supuesto) a los elementos que son mencionados en el libro. Entre ( ) figura el símbolo químico con que se designan el hidrógeno, el carbono, etc. En la última columna (de lectura optativa) se presentan algunos isótopos naturales de los distintos elementos<sup>8</sup>.

**TABLA I-1**

Elemento	Número de protones	Algunos isótopos naturales
Hidrógeno (H)	1	$^1\text{H}$ , $^2\text{H}$ , $^3\text{H}$ [ $^1\text{H}$ : 99,98 %]
Carbono (C)	6	$^{12}\text{C}$ , $^{13}\text{C}$ , $^{14}\text{C}$ [ $^{12}\text{C}$ : 98,89 %]
Sodio (Na)	11	$^{23}\text{Na}$
Aluminio (Al)	13	$^{26}\text{Al}$ , $^{27}\text{Al}$ [ $^{27}\text{Al}$ : 99,9 %]
Cloro (Cl)	17	$^{35}\text{Cl}$ , $^{37}\text{Cl}$ [ $^{35}\text{Cl}$ : 75 %]
Cromo (Cr)	24	$^{50}\text{Cr}$ , $^{52}\text{Cr}$ , $^{53}\text{Cr}$ , $^{54}\text{Cr}$ [ $^{52}\text{Cr}$ : 83,8 %]
Hierro (Fe)	26	$^{54}\text{Fe}$ , $^{56}\text{Fe}$ , $^{57}\text{Fe}$ , $^{58}\text{Fe}$

<sup>8</sup> El superíndice a la izquierda del símbolo del elemento da el número de protones más el número de neutrones en cada átomo. El símbolo  $^1\text{H}$  del isótopo del hidrógeno se lee: hidrógeno 1. De igual manera, los isótopos restantes de los otros elementos, por ejemplo:  $^{27}\text{Al}$ , se lee: aluminio veintisiete, que indica que el átomo de ese isótopo de aluminio está formado por 13 protones y 14 neutrones. Cuando la proporción en la naturaleza de uno de los isótopos es grande, el % se indica entre [ ]. Referencia: IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada), Tabla Periódica de los Isótopos.

		[ <sup>56</sup> Fe: 91,75 %]
Níquel (Ni)	28	<sup>58</sup> Ni, <sup>60</sup> Ni, <sup>61</sup> Ni, <sup>62</sup> Ni, <sup>64</sup> Ni [ <sup>58</sup> Ni: aprox. 70 %]
Cobre (Cu)	29	<sup>63</sup> Cu, <sup>65</sup> Cu [ <sup>63</sup> Cu: aprox. 70 %]
Plata (Ag)	47	<sup>107</sup> Ag, <sup>109</sup> Ag
Tungsteno (W)	74	<sup>180</sup> W, <sup>182</sup> W, <sup>183</sup> W, <sup>184</sup> W, <sup>186</sup> W
Platino (Pt)	78	<sup>192</sup> Pt, <sup>194</sup> Pt, <sup>195</sup> Pt, <sup>196</sup> Pt, <sup>198</sup> Pt
Oro (Au)	79	<sup>197</sup> Au
Plomo (Pb)	82	<sup>204</sup> Pb, <sup>206</sup> Pb, <sup>207</sup> Pb, <sup>208</sup> Pb [aprox. 52 %]

## APÉNDICE II

### A) Estructuras de diferentes metales y tamaños de las celdas geométricas que las describen

(a temperatura ambiente (20° C) y presión atmosférica normal).

(Los datos de las Tablas II-1a y II-1b, provienen de distintas fuentes. Recordar el tema desarrollado en el Epílogo)

**TABLA II-1a. De estructura cúbica de caras centradas**

	<b>Tamaño de la celda</b>
--	---------------------------

<b>Metal</b>	(medida de la arista) <b>(nm) *</b>
Plomo (Pb)	0,49495
Plata (Ag)	0,40856
Oro (Au)	0,40783
Aluminio (Al)	0,40490
Platino (Pt)	0,39237
Cobre (Cu)	0,36153
Níquel (Ni)	0,35238

\* nm: nanometro.  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ . Es decir, en 1 m hay  $10^9$  nm

**Tabla II-1b. De estructura cúbica de cuerpo centrado**

<b>Metal</b>	<b>Tamaño de la celda</b> (medida de la arista) <b>(nm) *</b>
Sodio (Na)	0,42906
Tungsteno (W)	0,31648
Cromo (Cr)	0,28845
Hierro (Fe)	0,28664

\*  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ . Es decir, en 1 m hay  $10^9$  nm

**Tres comentarios** antes de seguir adelante:

1- De las tablas se ve que, si bien son distintos, los tamaños de las celdas no difieren mucho entre sí; son del mismo **orden de magnitud**.

2- Son numerosos en el mundo los grupos de investigación (algunos en Argentina) que, usando diferentes técnicas experimentales, miden las separaciones entre los átomos de los cristales para determinar los tamaños de celdas.

3- Las celdas cúbicas de caras centradas y de cuerpo centrado mencionadas hasta aquí no son las únicas que permiten describir el arreglo geométrico de los átomos en los cristales, aunque son las únicas que consideraremos en este libro. Hay, además, otras

12. En total son 14 celdas distintas, las llamadas celdas de Bravais.

## **B) Cómo construir las diferentes estructuras**

### **Materiales**

- Esferas de igual diámetro que se puedan pinchar con escarbadientes (por ejemplo de poliestireno expandido. En Argentina, este material es generalmente conocido como Telgopor<sup>®</sup>, que es marca comercial de la empresa Hulytego que lo fabrica). Unas veinte.
- Escarbadientes.

**Procedimiento para construir la estructura cúbica de caras centradas** (Recordar que las respuestas a las preguntas pueden encontrarse en **Respuestas a las preguntas planteadas**, en el punto correspondiente al Apéndice II).

- 1- Construir una capa de esferas en contacto. Para ello, ubicar sobre una mesa (en realidad solo es necesario que sea una superficie plana) una esfera. Rodearla por el mayor número posible de esferas en contacto, uniéndolas con escarbadientes, como está indicado en el esquema de la figura II 1a (capa I de esferas). Con un marcador de color pintarlas o hacerles una marca a cada una de ellas (en la

figura es color rojo). Observar que, aunque las esferas están unidas entre si en la forma más compacta posible, quedan huecos entre ellas. Como no podía ser de otra manera en este libro, van tres preguntas: ¿Qué forma tienen estos huecos? ¿Se diferencian en algo entre sí? Cada esfera, ¿por cuántas esferas está rodeada?

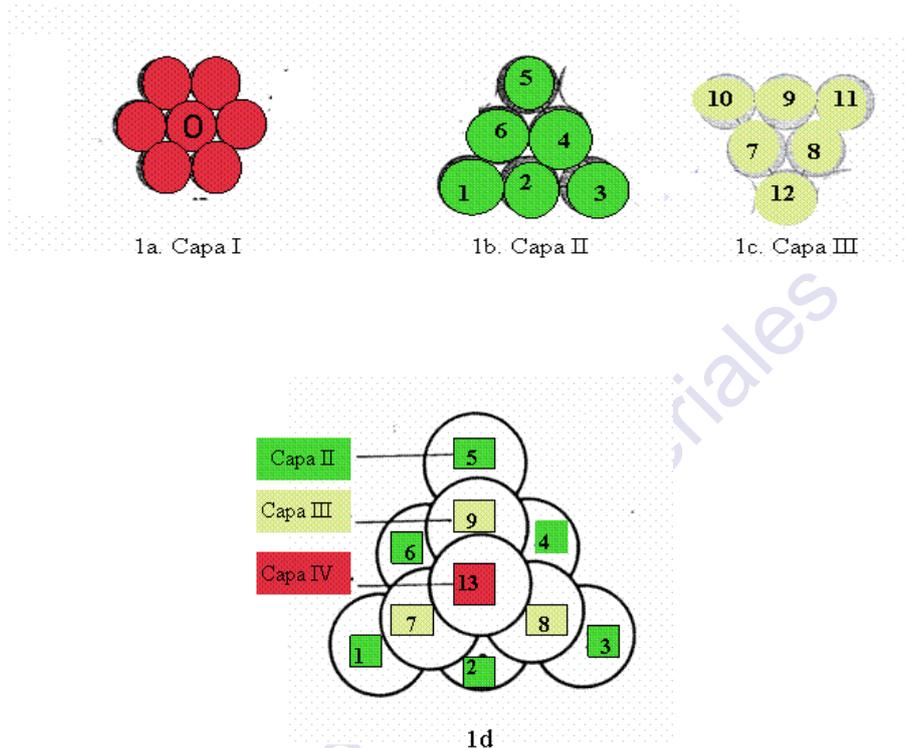


Figura II 1. a) Capa I de esferas en contacto; b) Capa II de esferas en contacto; c) Capa III de esferas en contacto; d) Superposición de las capas I, II, III y IV.

- 2- Unir otras seis esferas como está indicado en la figura II 1b (capa II de esferas). Después de ponerle un número a cada una de ellas (para facilitar la interpretación, conviene que sean números sucesivos) y pintarlas con un marcador de un color distinto al anterior (se usó el verde en la figura), ubicar la capa II sobre la capa I de modo que cada esfera de la capa II quede sobre un hueco de la capa I (ver figura II 1d). Sujetar las capas entre sí a través de escarbadienes (después pueden pegarse). ¿Sobre todos los huecos de la capa I quedaron ubicadas esferas de la capa II?

- 3- Construir una capa III idéntica a la capa II y continuar numerando y pintando cada esfera usando un marcador de otro color (en la figura II 1c se usó amarillo). Superponerla a la capa II, ubicando cada esfera de la capa III sobre los huecos no tapados de la capa I (ver figura II 1d. Para simplificar la figura solo se dibujan tres esferas de la capa III). Sujetar entre si las capas.
- 4- Ubicar una esfera (capa IV), pintada con el mismo color que las esferas de la capa I, de modo que quede en un hueco de la capa III y superpuesta con la esfera central de la capa I (esfera 13 en la figura II 1d). Sujetarla.
- 5- De la capa I, dejar solo la esfera del centro, sacando (con cuidado para que no se desarme nuestra construcción!) las restantes (la capa I completa ya fue usada para responder algunas preguntas, y no se necesita más).
- 6- Levantar de la mesa, rotar y observar el cuerpo formado para poder responder la siguiente pregunta: ¿Quedó formada alguna de las estructuras que fueron descriptas?

Si, efectivamente!; quedó formada una estructura cúbica de caras centradas, donde cada esfera representa un átomo (Figura II 2a).

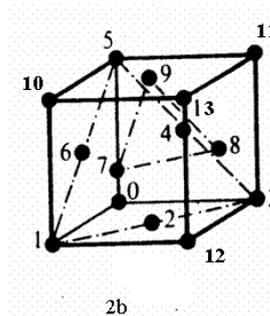
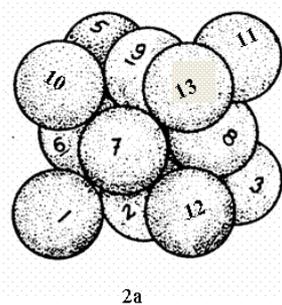


Figura II 2. a) Representación de la estructura cúbica de caras centradas; b) Representación de la celda cúbica de caras centradas (los átomos están representados por sus centros).

Pero ya que el trabajo de construirla no fue fácil, y sabiendo que puede ser usada para describir metales de estructura cúbica de caras centradas, aprovechémosla para ver algunas características más de estos cristales. Miremos la capa II (en la figura II 1b; la de color verde). ¿Qué diferencia puede señalarse entre las esferas de esa capa II, que ahora quedó como un plano diagonal dentro de la celda (ver figura II 2b), y las esferas ubicadas en las caras del cubo? La respuesta no es difícil de dar si se observa con cuidado la celda construida y la figura II 2a: en el plano diagonal (la capa II) cada esfera se toca con las vecinas próximas. El plano diagonal es un **plano compacto**. En las caras del cubo no pasa lo mismo; las esferas de los vértices (ver, por ejemplo las esferas 10 y 13 de la figura II 2a) no se tocan entre sí, quedan separadas. Las caras del cubo no forman planos compactos. Como cada esfera se corresponde con un átomo de un material de estructura cúbica de caras centradas, podemos predecir que encontraríamos esos mismos espacios entre los átomos. Y estos espacios que quedan entre los átomos de la estructura (y no solo de la estructura cúbica de caras centradas, sino de toda estructura cristalina), tienen gran importancia porque allí pueden ubicarse otros átomos más pequeños.

En los esquemas de las figuras II 3a y II 3b se muestra cómo puede construirse una estructura cúbica de cuerpo centrado. Después de la experiencia adquirida en la construcción anterior, es seguro que no presentará ningún problema.

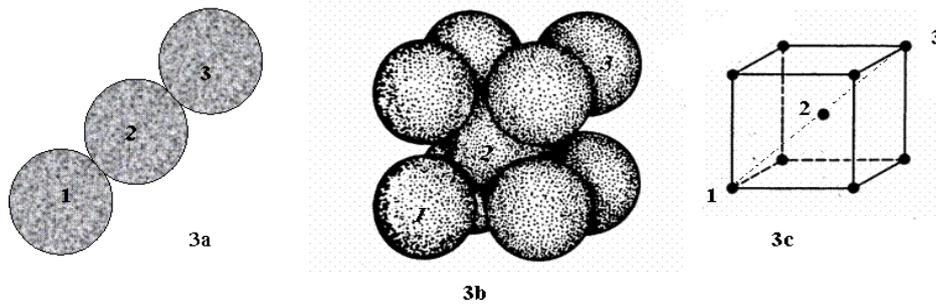


Figura II 3. a) Tres esferas alineadas; b) Representación de la estructura cúbica de cuerpo centrado; c) Celda cúbica de cuerpo centrado.

No puede faltar una pregunta sobre esta estructura. ¿Hay algún plano (o capa) en la que los átomos estén en contacto con sus vecinos más próximos? Es claro que **no**. La estructura cúbica de cuerpo centrado no tiene planos compactos.

Si bien no hay planos compactos en la celda cúbica de cuerpo centrado, sí hay direcciones compactas en las cuales los átomos vecinos se tocan entre sí; son las diagonales del cubo (línea de esferas 1, 2 y 3 en la figura II 3b). ¿Hay direcciones compactas en la estructura cúbica de caras centradas? **Sí**, son las diagonales de las caras (volver a ver las figuras II 2a y II 2b y la celda cúbica de caras centradas construida).

Un ejemplo de la importancia de los huecos que quedan entre los átomos: En los **aceros** (que son aleaciones de hierro y carbono) los átomos de carbono (que son los más pequeños) están ubicados en algunos de los huecos que quedan entre los átomos de hierro que, a temperatura ambiente, tiene una estructura cúbica de cuerpo centrado. Y no es necesario que yo les cuente sobre la importancia de los aceros en la vida diaria!

Finalmente, los invito a crear una vacancia en la celda cúbica de caras centradas o en la celda cúbica de cuerpo centrado o en ambas, si lo prefieren. Solo es necesario sacar una de las esferas que forman las celdas ya que, como se dijo anteriormente, una vacancia es la ausencia de un átomo de la estructura cristalina.

Nota: Volver ahora nuevamente al tema **Los materiales cristalinos**, y luego regresar a este punto del APÉNDICE II para realizar el experimento final que se propone a continuación.

Usar las estructuras que hemos construido para responder una de las preguntas que nos habíamos hecho: Si la presión sobre un material aumentara, ¿qué ocurriría con los tamaños de las celdas? ¿La recuerdan? La habíamos formulado al final del tema: **Los materiales cristalinos**. Manos a la obra, aumentemos la presión sobre nuestra estructura cristalina! Para hacer más fácil el experimento apoyémosla sobre una mesa y empujemos la cara superior del cubo hacia abajo. ¿La longitud de las aristas verticales aumenta o disminuye? Por supuesto dieron la respuesta correcta: disminuyen! Por lo tanto, los tamaños de las celdas son menores si se determinan a presiones mayores que la presión atmosférica normal.

### **APÉNDICE III**

#### **Otros polímeros**

Además de la cadena de polietileno (figura III 1a), que se mostró también en un punto anterior, se representa en la figura III 1b de este Apéndice, la cadena ordenada del polipropileno, material que se usa, entre otras cosas, para la fabricación de las copas descartables y de broches para colgar la ropa. Como se ve, esta cadena es más compleja

que la anterior: si bien solo están involucrados átomos de carbono y de hidrógeno, parte de estos (un carbono y 3 hidrógenos) se unen entre sí para formar el grupo  $\text{CH}_3$  que, como tal, se une a su vez con otro átomo de carbono.

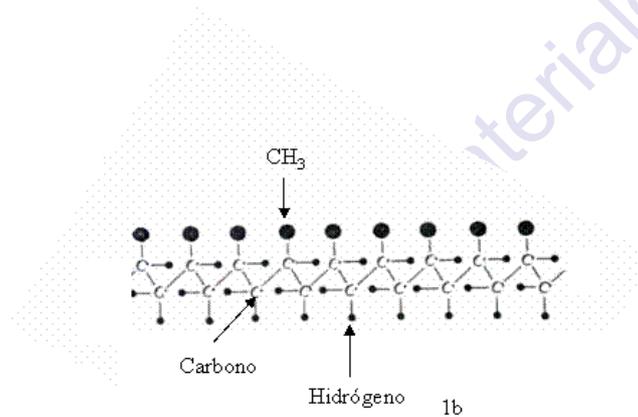
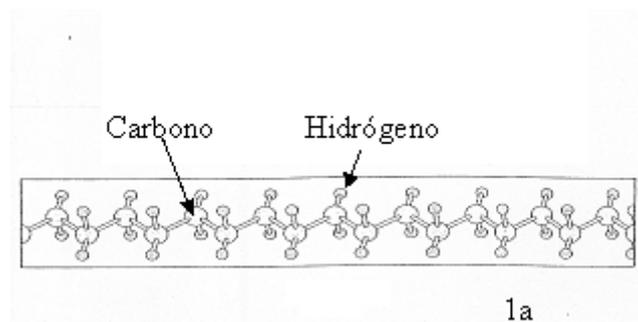


Figura III 1. a) Representación de la cadena del polietileno; b) Representación de la cadena del polipropileno regular.

En otros polímeros la distribución de los grupos de átomos es aún mucho más complicada y forman una red tridimensional; ni siquiera pueden identificarse cadenas (un esquema se presenta en la figura III 2).

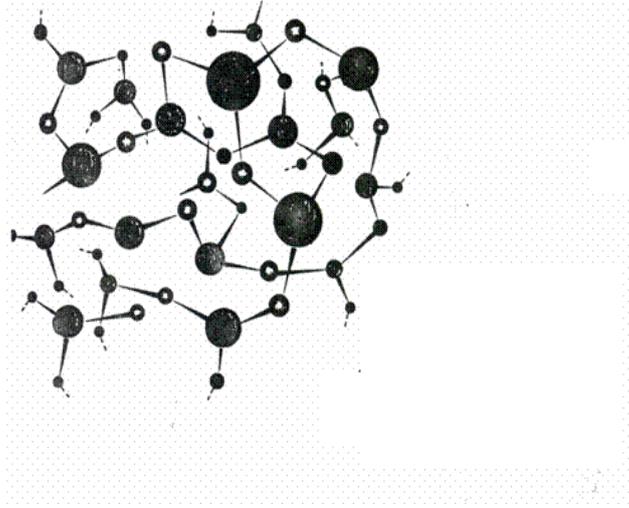


Figura III 2. Representación de un polímero tridimensional. Los círculos representan grupos de átomos.

Ahora, para finalizar este brevísimo Apéndice III y para que lo puedan compartir con la familia, les presento el siguiente problema:

Pensando en las comidas habituales, ¿qué plato serviría para explicar y visualizar durante un almuerzo o una cena la estructura de un polímero?

#### **APÉNDICE IV**

A continuación se hace una muy breve mención a diferentes instrumentos que nos permiten mirar los materiales.

##### **Lupa**

Seguramente usada en más de una ocasión por todos los lectores de este libro, es una lente mediante la cual pueden verse los objetos entre aproximadamente dos y cinco veces más grandes, dependiendo de la calidad de la lupa. Debido a esta baja magnificación la lupa no es útil para ver la microestructura de los materiales.

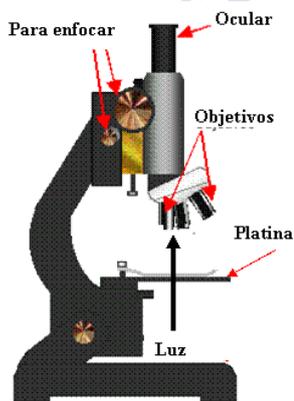
## Microscopios

(de *micro-*, μικρο, pequeño, y *scopio*, σκοπεω, observar)

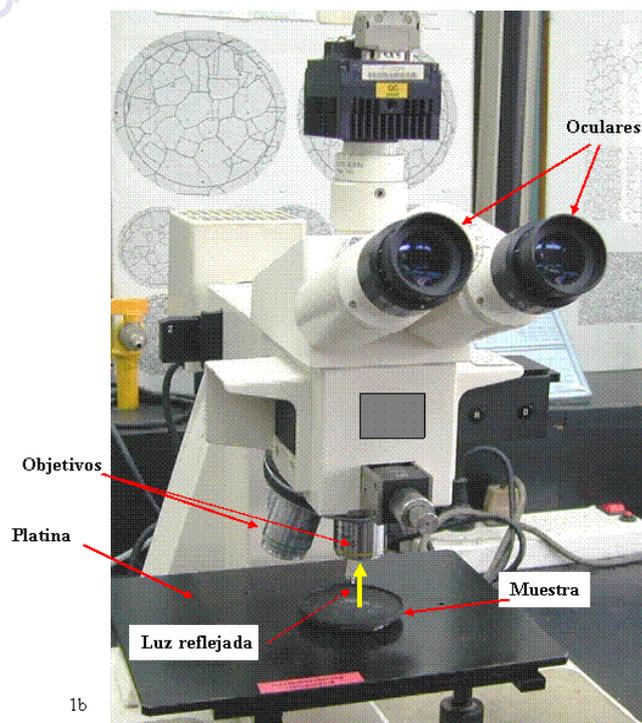
### Microscopio óptico

Es un dispositivo que permite aumentar (en general, hasta aproximadamente unas 2000 veces) el tamaño de muy pequeños objetos cuando se iluminan con luz. Su uso es muy frecuente para el estudio de los materiales.

El microscopio óptico está formado por dos conjuntos de lentes combinadas: las lentes que componen el objetivo (que están más cercanas a la muestra que se estudia) y las lentes que componen el ocular (a través del cual se mira la imagen). Ambos conjuntos se encuentran ubicados en los extremos de un tubo, como está mostrado en la figura IV 1a. Las lentes del objetivo, cuando reciben la luz del objeto, forman una imagen aumentada del mismo, que a su vez es aumentada por las lentes del ocular. En general, el aumento total que se consigue con un microscopio es el producto del aumento del objetivo y del aumento del ocular. La muestra a estudiar se ubica sobre la platina (figuras IV 1a y 1b).



1a



1b

Figura IV. a) Microscopio óptico biológico; b) Microscopio óptico metalográfico.

Cuando las muestras que se estudian son transparentes, la luz que las ilumina se encuentra debajo de la platina. Esa es la ubicación en los **microscopios biológicos** (son los que se encuentran en la mayoría de las jugueterías además de, por supuesto, en los negocios especializados). Probablemente los lectores hayan visto gotas de agua, células de cebolla, algunas hojas o algún polímero, en este tipo de microscopios. Pero... ¿podrá estar la luz ubicada en esa posición si lo que quiere verse es, por ejemplo, la microestructura de un metal? Estoy segura que dieron la respuesta correcta: **No**. Claro, los metales son opacos; si se iluminaran desde abajo no dejarían pasar la luz para que entre al objetivo y pueda formarse la primera imagen aumentada. Es por eso que en los microscopios que se usan para estudiar los metales y las cerámicas y, en general, materiales opacos, es la luz reflejada en la muestra la que entra al objetivo y forma esa primera imagen aumentada (figura IV 1b). Estos **microscopios** son llamados **metalográficos**.

Para que la luz reflejada sea suficiente, es necesario que la superficie de la muestra esté plana y brillante. Y esto se consigue a través de sucesivos pulidos, que se inician con un pulido mecánico que se realiza, a su vez, con sucesivos papeles de esmeril (similares a los que se usan para lijar las paredes antes de pintar, por ejemplo). Estos sucesivos papeles van teniendo cada vez menor granulometría (son más finos). En el último paso de la preparación de la superficie, por lo general, se somete a la muestra al efecto de algún reactivo líquido (por ejemplo un ácido) o de alguna pasta de pulido, que hacen desaparecer las últimas rayas dejadas por el pulido con papel, al mismo tiempo que la superficie queda brillante. Generalmente, para observar la microestructura del material es necesario, luego de obtener la superficie plana y brillante, sumergir la muestra en otro

reactivo químico (particular para cada material) y, entonces sí, ¡lista la muestra para ser vista al microscopio!

Ahora bien, si leer (y, por supuesto, entender) el párrafo anterior lleva su tiempo, ¡no pueden imaginarse el tiempo que lleva cumplir en la práctica con todos esos pasos! Para que puedan tener una idea de este tiempo les propongo, en el **APÉNDICE V**, un instructivo y ¿entretenido? trabajo práctico: **Pulido mecánico de un metal**, en el que se completará solo la primera parte de la preparación de la superficie.

### Microscopio electrónico

Es un equipo que, como el microscopio óptico, permite obtener una imagen aumentada de objetos muy pequeños. A diferencia del microscopio óptico que utiliza luz para formar las imágenes, el microscopio electrónico utiliza un haz de electrones. Por otra parte, el equivalente a las lentes de vidrio del microscopio óptico, son las lentes electromagnéticas, y son estas lentes las que permiten enfocar los electrones sobre la muestra. Los microscopios electrónicos tienen un gran tamaño (normalmente ocupan una sala) y permiten obtener aumentos muy superiores a los que pueden conseguirse con los mejores microscopios ópticos y una mayor definición en las imágenes.

Aumentos de 50.000x - 100.000x, no son difíciles de conseguir. Pueden examinarse muestras biológicas (como microorganismos, células o tejidos en biopsias médicas), moléculas grandes, la estructura de metales y otros cristales, entre otras cosas.

En particular, los microscopios electrónicos de transmisión de alta resolución (TEM) permiten, con el haz de electrones, obtener imágenes de superficies donde, como ya se mencionó y como se muestra la figura IV 2, pueden distinguirse los átomos individuales. Conocer las características de las superficies es muy importante porque, entre otras cosas, permite entender mejor el comportamiento de muestras de muy

pequeño tamaño (tal vez oyeron hablar de los nanomateriales) que, en general, es distinto del comportamiento de las muestras de mayor tamaño que son las que venimos analizando en el libro.

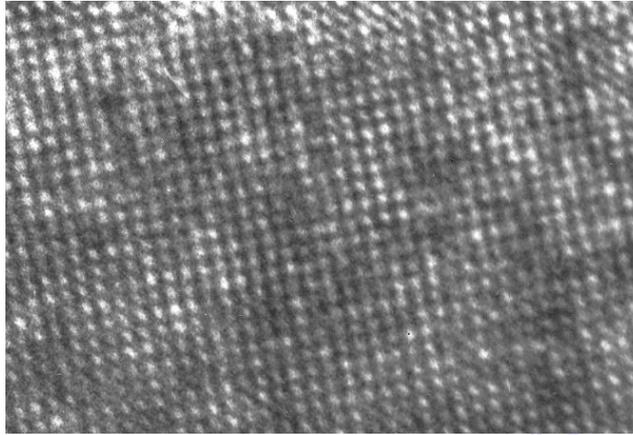


Figura IV 2. Imagen de alta resolución de la superficie de un cristal, en la que se ven los átomos individuales. Foto obtenida en el microscopio electrónico de transmisión en el Centro Atómico Bariloche de la Comisión Nacional de Energía Atómica. Atención Paula Alonso y Gerardo Rubiolo.

#### Microscopio de efecto túnel

Es un instrumento que también forma la imagen de cada uno de los átomos que se encuentran sobre la superficie de un material. La imagen precisa se obtiene mediante el desplazamiento de una punta conductora colocada muy cerca de la superficie a ser estudiada. Por el diseño del primer microscopio de efecto túnel sus inventores, **Gerd Binnig**<sup>9</sup> y **Heinrich Rohrer**<sup>10</sup> ganaron el Premio Nobel de Física en 1986. Lo

---

<sup>9</sup> **Gerd Binnig**: Nació en Alemania en 1947. A los 10 años ya dijo que sería físico, aunque no sabía muy bien qué era la física. Cuando estaba estudiando en la universidad, comenzó a cuestionarse si era lo que efectivamente le gustaba y comenzó a dedicarse a estudiar música. Llegó a formar su propia banda, aunque no abandonó los estudios universitarios que finalizó exitosamente. En 1978 aceptó una oferta de IBM para trabajar en la empresa, en Suiza (Zurich) y es allí donde, junto con Rohrer, desarrolla el microscopio de efecto túnel. Actualmente sigue trabajando en IBM.

compartieron con el científico alemán **Ernst Ruska**<sup>11</sup>, que fue uno de los diseñadores del primer microscopio electrónico, entre los años 1925 y 1930.

## APÉNDICE V

### Trabajo práctico: Pulido mecánico de un metal

**Objetivo del trabajo práctico:** Pulir una chapita de metal.

#### Materiales:

- Una chapita de metal (puede ser de aluminio, cobre, hierro, acero, por ejemplo). No conviene que sea muy pequeña, porque se corre el riesgo de pulirse el dedo!!!
- Papeles de esmeril (al agua) de granulometría 220, 320, 400 y 600 (en ese orden son cada vez más finos. Si en la ferretería no se consiguen todos, no es para preocuparse, solo se tendrá un poco más de trabajo).

#### Desarrollo:

- 1- Ubicar el papel 220 (o el más grueso que se haya conseguido) sobre una superficie plana dentro de una pileta (puede ser directamente el fondo de la pileta). Abrir un poquito la canilla ya que, para pulir, los papeles deben estar mojados.

---

<sup>10</sup> **Heinrich Rohrer:** Nació el 6 de junio de 1933 (media hora después de su hermana gemela) en Suiza. Pasó su infancia en el campo hasta que su familia se mudó a la ciudad de Zurich en 1949. Estudió física en la Escuela Politécnica Federal de esta ciudad. En 1963 entró a formar parte del Laboratorio de investigación de la empresa IBM en Zurich, donde conoció a Gerd Binnig, y con el cual inició investigaciones acerca de los microscopios ópticos y electrónicos hasta desarrollar y perfeccionar el microscopio de efecto túnel.

<sup>11</sup> **Ernst August Ruska** (1906 - 1988). Físico e ingeniero electrónico alemán. Antes de finalizar la Universidad, ya había realizado el trabajo científico al que debe su reconocimiento. Comprendió que con un haz de electrones se podía conseguir una imagen con una resolución mayor que con un haz luminoso y que los campos magnéticos podían dirigir y enfocar los electrones como las lentes ópticas lo hacen con la luz. Después de confirmar esos principios mediante la investigación, trató de diseñar un microscopio electrónico. Junto con el físico alemán Max Knoll, construyó el primero en 1932 que, a pesar de que era rudimentario y carecía de uso práctico, era capaz de ampliar los objetos 400 veces, produciendo imágenes mucho más precisas que los microscopios ópticos de la época.

2- Tomar la muestra elegida y ubicar una de las caras sobre el papel de esmeril (figura V 1a). Hacer presión sobre ella. Pulirla haciendo movimientos hacia adelante y hacia atrás. Mirar la superficie que se está puliendo después de algunos minutos. Si los movimientos están correctamente hechos y el tiempo fue suficiente, se verá  **toda** la superficie con rayas paralelas de un cierto grosor (figura V 1b). Cuando esto ocurra, el pulido con ese papel está terminado.

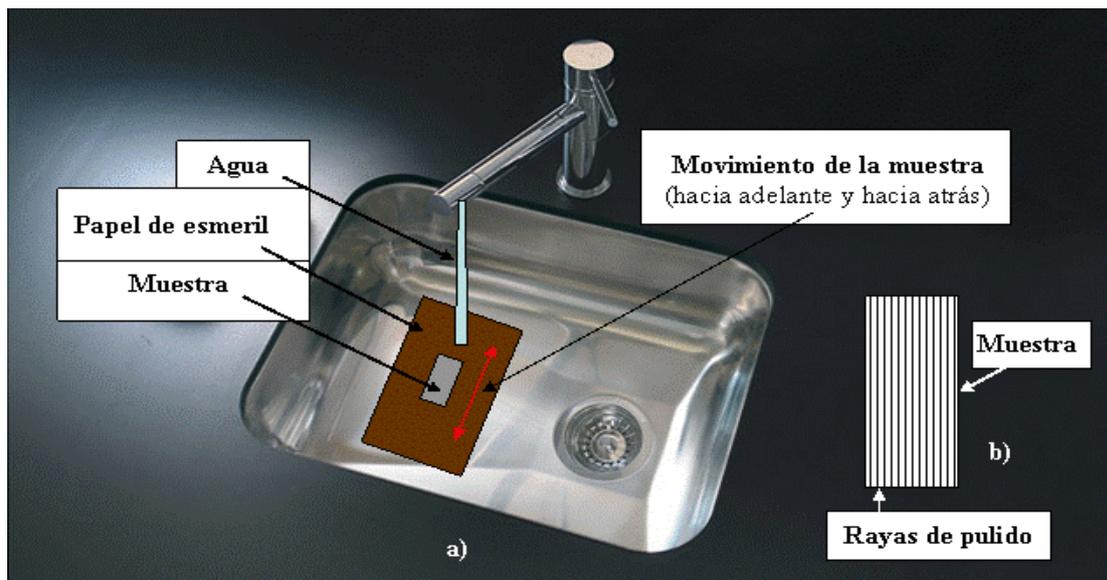


Figura V 1. a) Ubicación del papel de esmeril y de la muestra a pulir. Se indica el movimiento para realizar el pulido; b) Rayas de pulido paralelas dejadas por el primer papel de esmeril.

3- Lavar la muestra bajo un chorro de agua.

4- Retirar el papel 220 de la piletta y ubicar en el mismo lugar el papel de granulometría 320 (o el que le sigue, en granulometría descendiente, al primero que se usó). (Nota: no olvidarse de abrir la canilla).

5- El pulido en el nuevo papel debe hacerse de manera que las rayas que se produzcan sean perpendiculares a las producidas por el papel anterior. Esto se consigue apoyando la misma cara de la muestra sobre el nuevo papel, pero girada en 90° respecto de la

posición que tenía en el punto 2 (figura V 1c) y repitiendo los movimientos hacia adelante y hacia atrás. El tiempo de pulido es ahora el necesario para eliminar las rayas que fueron producidas por el primer papel. Justamente, esto es posible de visualizar porque las rayas anteriores están a  $90^\circ$  de las nuevas rayas.

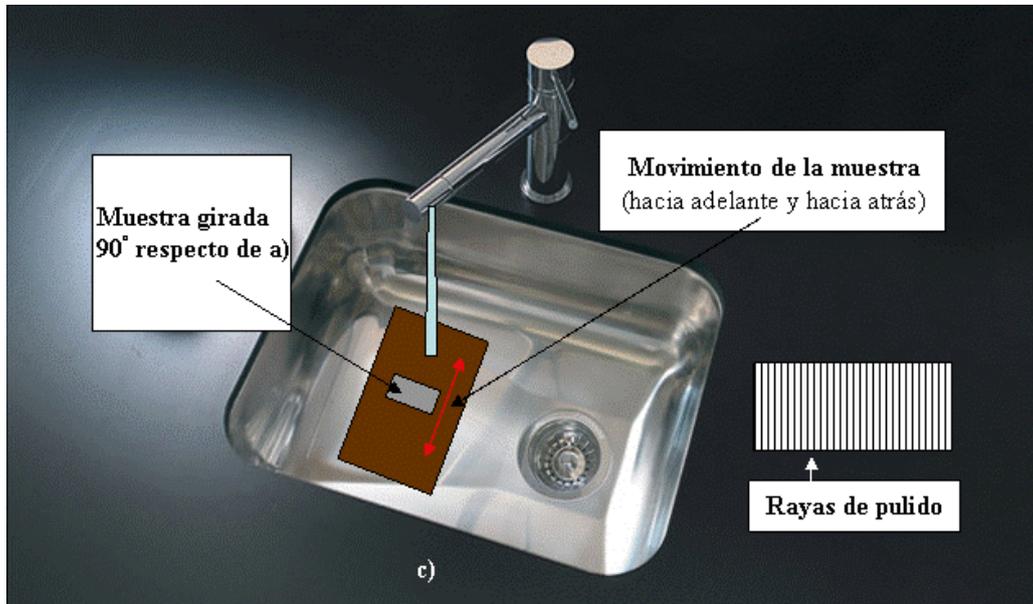


Figura V 1.c) Ubicación de la muestra a  $90^\circ$  de la posición en a. Muestra con las nuevas rayas de pulido.

6- Repetir el paso 4 (ahora retirando el papel 320 y ubicando el 400) y el paso 5, recordando lavar y rotar en  $90^\circ$  la muestra antes de comenzar el pulido. Hacer luego lo mismo con el papel de esmeril 600.

Al finalizar el pulido mecánico, solo se deben ver las rayas paralelas dejadas por el papel de esmeril 600, que deberán ser borradas con los líquidos de pulido. Pero ya se necesitan salas especiales. Nosotros, por esto, debemos interrumpir el pulido en esta etapa. ¿Cuánto tiempo usaron para cumplimentar todos estos pasos? ¡Hay que ser paciente! Pero seguro que les resultó más fácil hacer el pulido que leer la descripción de todos los pasos a seguir. ¿No es cierto?

**Nota:** Van dos recomendaciones (1 y 2) y un comentario (3):

- 1- Si la muestra a pulir es muy delgada, puede usarse una cinta adhesiva para sujetarla al dedo y evitar que se “escape”.
- 2- Si la muestra es alta, se debe tener el cuidado de hacer la fuerza pareja sobre toda la superficie, para evitar que la muestra sufra un movimiento de oscilación. Este movimiento produciría dos superficies que forman un ángulo diedro (facetado), y no una superficie plana.
- 3- Un vidrio grueso (lo suficiente como para que no se rompa al hacer presión) ubicado en la pileta es muy conveniente para usar como superficie plana sobre la que se apoyan los papeles de esmeril.

## APÉNDICE VI

### **EPÍLOGO:** Parte 2

(lectura optativa)

Como hemos dicho en la Parte 1 del Epílogo, aún cuando se realice un número grande de mediciones de una magnitud, el resultado numérico dado por el promedio aritmético **sólo se acerca al valor verdadero**. Y para que ese promedio tenga sentido, es necesario decir cuánto se acerca al valor verdadero. Y cuánto se acerca es indicado por el **error standard**  $\xi$  (o coloquialmente, simplemente error). Es por esto, que después de calcular el valor medio  $\bar{A}$  de un conjunto de mediciones de una magnitud, se dice que el valor de esa magnitud es:

$$\bar{A} \pm \xi \tag{2}$$

1- Veamos primero cómo se “lee” la expresión (2).

$\bar{A} \pm \xi$  es la unión de dos expresiones:  $\bar{A} + \xi$  y  $\bar{A} - \xi$ , donde:

- $\bar{A} + \xi$  define un valor mayor que  $\bar{A}$  y

- $\bar{A} - \xi$  define un valor menor que  $\bar{A}$ .

Entre ese valor mayor que  $\bar{A}$  y ese valor menor que  $\bar{A}$  queda definido un intervalo de valores (de longitud  $2\xi$ ) alrededor del valor medio  $\bar{A}$ . (ver **Recordatorio**, al final del Epílogo).

## 2- Veamos en segundo lugar cuál es el significado del error standard $\xi$

$\xi$  define, como se mencionó, un intervalo longitud  $2\xi$  ubicado alrededor del valor medio  $\bar{A}$ . Es dentro de este intervalo donde se encuentra el valor verdadero de la magnitud medida. Cuanto menor es el error standard  $\xi$ , menor es el intervalo y más cerca estará el valor medio calculado  $\bar{A}$  del valor verdadero.

## 3- Veamos en tercer lugar cómo se calcula el error standard $\xi$

Si las herramientas matemáticas de alguna o alguno de ustedes no son suficientes para poder realizar este cálculo no se preocupen. Lo importante es que tengan claro cuál es el significado de  $\xi$ . Pero si pueden, adelante!

1) Como introducción veamos primero otra forma de escribir el promedio aritmético de los valores medidos dado por la fórmula (1) de la Parte 1 del Epílogo. Esta fórmula (1) puede escribirse en forma compacta como:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{N} \quad (3)$$

Donde  $N$  es el número total de medidas realizadas en cada experimento, en nuestro caso 12.

La letra griega  $\Sigma$  (sigma mayúscula, que matemáticamente se lee sumatoria) indica la suma (sumatoria) de todos los resultados de las medidas realizadas y la letra  $i$  los

sucesivos números de orden de la medida. Considerando cada uno de nuestros experimentos,  $i$  toma los valores 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y los  $A_i$  correspondientes los valores  $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}, A_{11}, A_{12}$ . El primer valor de  $i$  (1 en nuestros experimentos) se indica debajo del signo sumatoria y el último valor de  $i$  (que es  $N$ ) se indica arriba del signo sumatoria.

## 2) Cálculo del error standard

$\xi$  se calcula como:

$$\xi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{A} - A_i)^2}{N^2}} \quad (4)$$

Con lo señalado en 1) es muy fácil dar una explicación de los sucesivos pasos para usar la fórmula anterior. Tomando, por ejemplo, los resultados del experimento 1:

- calcular el valor  $\bar{A}$  a partir de los doce valores  $A_i$  medidos (fórmula 1).
- calcular los doce valores  $\bar{A} - A_i$ , es decir:  $(\bar{A} - A_1); (\bar{A} - A_2); \dots; (\bar{A} - A_{12})$ .
- calcular  $(\bar{A} - A_i)^2$ , recordando que es:  $(\bar{A} - A_i) \times (\bar{A} - A_i)$  para cada  $i$ .
- Hacer la suma de los doce valores  $(\bar{A} - A_i)^2$  obtenidos.
- Calcular  $N^2 = 12^2 = 12 \times 12$ .
- Dividir el resultado obtenido en d) por el resultado obtenido en e).
- Sacar la raíz cuadrada del resultado obtenido en f)

El valor obtenido en g) es el error standard  $\xi$  de nuestras medidas. La longitud de nuestra mesa se debe indicar como el valor de  $\bar{A}$  obtenido en a),  $\pm$  el valor de  $\xi$  obtenido en g):

$$\bar{A} \pm \xi \quad (5)$$

Volviendo a mirar las Tablas II del Apéndice II y como ya se mencionó, a pesar de que las técnicas experimentales usadas para determinar los tamaños de celda permiten obtener los valores con errores extremadamente pequeños, esos errores existen!. Y afectan la quinta cifra decimal. Esto significa que todos los valores dados en las tablas (que ya sabemos que son valores medios), tienen un error  $\xi = \pm 0,0000X$  nm. Si en particular suponemos que  $X = 4$ , el tamaño de la celda geométrica por ejemplo del plomo debería escribirse:  $(0,49495 \pm 0,00004)$  nm. Y esto indica que el valor verdadero del tamaño de la celda geométrica del plomo es un número que está dentro del intervalo:  $0,49491 - 0,49499$ .

### Fin del Epílogo

Bueno, en realidad todavía falta una cosa prometida: el Recordatorio citado en el último punto 1. Va ahora:

Recordatorio: de cómo se obtiene intervalo  $2\xi$  definido por  $(\bar{A} + \xi) - (\bar{A} - \xi)$  (para los que saben trabajar con paréntesis. Si nunca trabajaron, no se preocupen y salteen este punto):

$$(\bar{A} + \xi) - (\bar{A} - \xi) = \bar{A} + \xi - \bar{A} + \xi = 2\xi. \quad (6)$$

## RESPUESTAS A LAS PREGUNTAS PLANTEADAS

Respuestas del Tema: Un experimento - Desarrollo

a) En una de las muestras **T** aplicar las fuerzas  $F_1$  como está indicado en la figura 19a.  
- ¿Qué se observa cuando se aplican esas fuerzas?

**R<sub>1</sub>**: La muestra se alarga.

- Si después de un tiempo  $t$ , y antes de que la muestra se rompa, deja de aplicar las fuerzas (suelta uno de sus extremos) ¿la longitud de muestra es mayor o menor que la longitud inicial?

**R<sub>2</sub>:** Al dejar de aplicar las fuerzas (al soltarla de un extremo) queda alargada. La muestra se **deformó plásticamente**.

b) Tomar la muestra **L**. Aplicar también las fuerzas  $F_1$  como está indicado en la figura 19b.

- ¿Qué se observa cuando se aplican las fuerzas?

**R<sub>3</sub>:** Al igual que antes, la muestra se alarga. El alargamiento es permanente. Se deformó plásticamente.

- ¿En qué muestra, la **T** o la **L** es necesario aplicar fuerzas mayores para obtener resultados equivalentes?

**R<sub>4</sub>:** Para conseguir el mismo aumento en la longitud, es necesario aplicar fuerzas mayores en la muestra **L**. La “resistencia” que ofrece esta muestra a alargarse es mayor.

c) Tomar la segunda muestra **T**. Volver a aplicar fuerzas como las indicadas en a).

Describir cuidadosamente lo que observa. Prestar especial atención a la evolución del ancho de la muestra que se está ensayando.

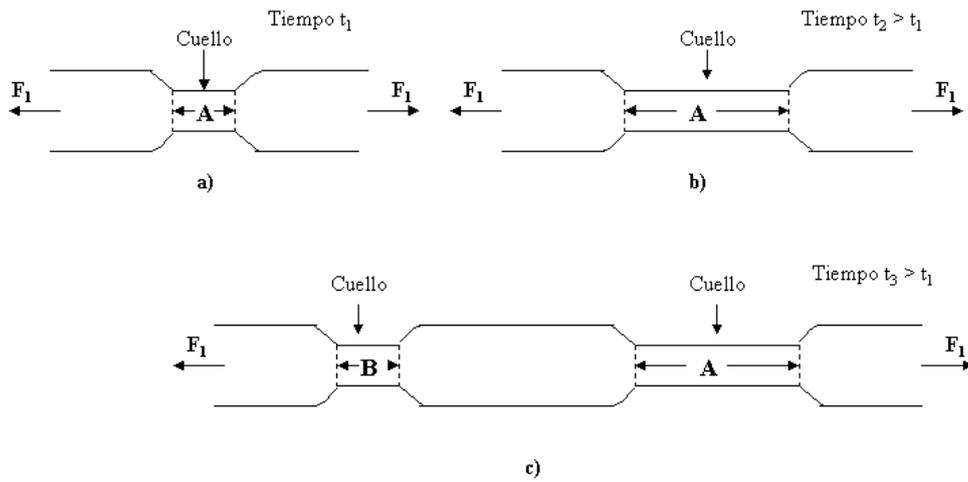


Figura R 1. Evolución del ancho de la muestra cuando se aplican las fuerzas  $F_1$  indicadas. a) Formación del cuello A; b) alargamiento del cuello A; c) Formación del nuevo cuello B.

**R<sub>5</sub>:** Instantes después de aplicadas las fuerzas, una región pequeña de la muestra disminuye su ancho (se forma un cuello (A)) (figura R 1a). Esta zona se alarga durante un tiempo, manteniendo fijo el ancho (figura R 1b), y luego se interrumpe su alargamiento. El proceso se repite en otra región de la muestra (que puede ser la región adyacente o no): se forma un nuevo cuello (B en la figura R 1c) y así sucesivamente, hasta que toda la muestra queda alargada y con un ancho menor al inicial (figura R 2).

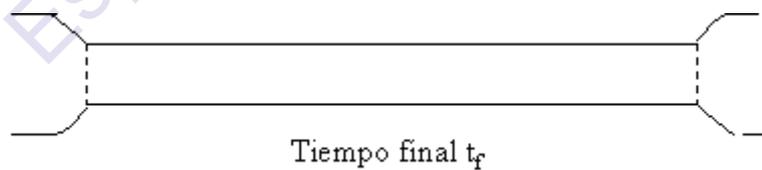


Figura R 2. Estado final de la muestra.

d) Tomar la tercera muestra T. Volver a aplicar fuerzas como las indicadas en a). Prestar ahora especial atención a la intensidad de las fuerzas que se aplican y responder los puntos 1, 2 y 3 que siguen.

1. Al iniciar el experimento, ¿es necesario hacer fuerzas grandes? **R<sub>6</sub>**: No. Una vez formado el primer cuello la deformación se produce sin necesidad de aplicar fuerzas grandes.
2. ¿Qué ocurre finalmente cuando se aplican las fuerzas durante un tiempo suficientemente largo? **R<sub>7</sub>**: La muestra se rompe.
3. Finalizado el experimento, y aún aplicando fuerzas grandes a la muestra resultante, ¿se consigue un aumento de su longitud? **R<sub>8</sub>**: La muestra resultante está dibujada en la figura R2. Como ya se mencionó, está deformada plásticamente: es más larga y más angosta que la muestra inicial. Además, se ha vuelto tan resistente que, aún aplicando fuerzas grandes, no se consigue un aumento de su longitud.

e) Tomar la bandita elástica y estirla. ¿Qué ocurre cuando suelta uno de sus extremos? Compare con lo que ocurría cuando ensayaba las tiras cortadas de la bolsa de supermercado.

**R<sub>9</sub>**: Al aplicar las fuerzas, la bandita elástica puede tener un gran alargamiento. Al dejar de aplicar las fuerzas (soltar un extremo de la bandita), la bandita vuelve a su tamaño inicial. El alargamiento es totalmente reversible. La bandita se deformó elásticamente. Por el contrario, al quitar las fuerzas aplicadas, las diferentes tiras cortadas de la bolsa de supermercado no recuperaban su tamaño inicial. El alargamiento es permanente, la muestra se deformó plásticamente.

Volver a **Un experimento**

Respuestas del Tema: Un experimento - Conclusiones

¿Sería más o menos útil la bolsa de supermercado, si al fabricarla se invirtieran las direcciones **T** y **L** iniciales, mostradas anteriormente en la figura 18?

**R<sub>10</sub>**: La nueva bolsa de supermercado se presenta en la figura R3. Como la resistencia a la deformación es menor en la dirección **T**, la bolsa se alargaría al poner las botellas. Por lo tanto, sería menos útil.



Figura R 3. Nueva bolsa de supermercado con las direcciones **T** y **L** intercambiadas.

### Respuestas del Tema: Juego de los siete errores

1- Las figuras A y B representan los núcleos de dos átomos (A y B) de un mismo elemento.

**R<sub>1</sub>**: No. Los núcleos tienen distinto el número de protones. Por lo tanto, los átomos A y B no pueden ser átomos de un mismo elemento.

2- La figura C representa la distribución de los átomos en una dirección **a** dentro de un cristal.

**R<sub>2</sub>**: No. Sobre una dirección dentro de un cristal, los átomos están igualmente espaciados.

3- La estructura del cristal descrito por la celda que está dibujada en la figura D es cúbica de caras centradas.

**R<sub>3</sub>:** No. La estructura es cúbica de cuerpo centrado.

4- Un microscopio óptico tiene un objetivo de 100x y un ocular de 10x. El aumento con el que se observa es de 300x.

**R<sub>4</sub>:** No. El aumento total es el producto del aumento del objetivo y del ocular. En este caso es 1000x.

5- La foto de la figura E (obtenida en un microscopio óptico) muestra la microestructura de una chapa de aluminio, que se pulió mecánicamente con los papeles de esmeril 220, 320, 400 y 600.

**R<sub>5</sub>:** No. Solo se ven las rayas del pulido mecánico, producidas por el último papel de esmeril usado.

6- Los policristales de las muestras M y N de la figura F tienen igual tamaño de grano.

**R<sub>6</sub>:** No. La muestra N tiene menor tamaño de grano. Se ve, por un lado, considerando directamente la indicación del aumento mostrada en la foto. Además, calculando el aumento con que se obtuvieron ambas microestructuras, resulta: en el caso de la muestra M con 100x; en el caso de la muestra N con 1000x. Eso significa que los granos de M se amplificaron 100 veces para obtenerse el tamaño con que se ven en la foto y los granos de N tuvieron que amplificarse 1000 veces para que se vieran del mismo tamaño en la foto.

7- Una vacancia de un cristal puede ser observada en un microscopio óptico metalográfico.

**R<sub>7</sub>:** No. Con el microscopio óptico pueden verse detalles de la microestructura de hasta un tamaño de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  (considerando un aumento alto, por ejemplo de 1000x). Es imposible ver una vacancia que tiene el tamaño de un átomo (aproximadamente  $10^{-10} \text{ m} = 10^{-4} \mu\text{m}$ ).

## Respuestas del Tema: Apéndice II. Cómo construir las diferentes estructuras

1- Ubicar sobre una mesa una esfera y unirla a otras seis con escarbadiantes, como está indicado en el esquema de la figura II 1a (capa I de esferas). Observar que, aunque las esferas están unidas entre si en la forma más compacta posible, quedan huecos entre ellas.

¿Qué forma tienen estos huecos? **R<sub>II 1</sub>**: Triangular (figura R4).

¿Se diferencian en algo entre sí? **R<sub>II 2</sub>**: Si. Algunos triángulos tienen la base hacia abajo y otros hacia arriba (figura R4).

Cada esfera, ¿por cuántas esferas está rodeada? **R<sub>II 3</sub>**: Seis esferas (figura R4).

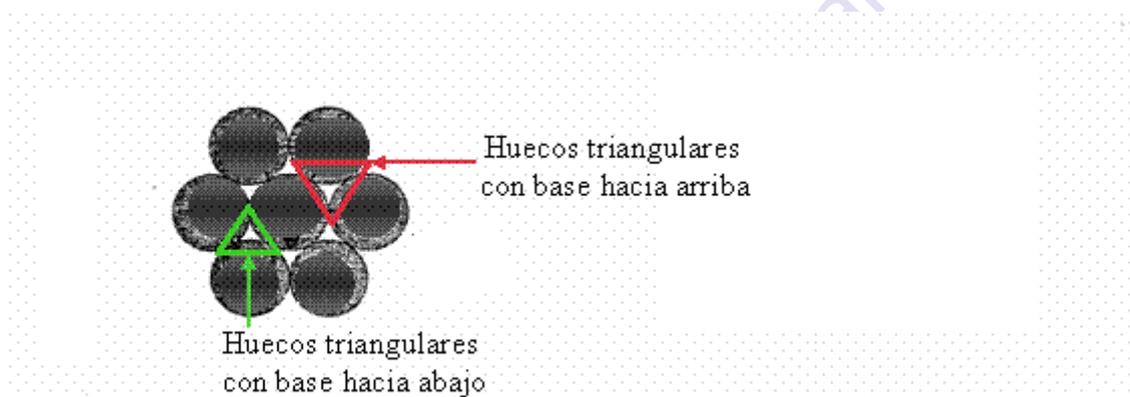


Figura R4. Huecos triangulares en las capas compactas de esferas.

2- Unir otras seis esferas como está indicado en la figura II 1b (capa II de esferas).

Ubicar la capa II sobre la capa I de modo que cada esfera de la capa II quede sobre un hueco de la capa I.

¿Sobre todos los huecos de la capa I quedaron ubicadas esferas de la capa II? **R<sub>II 4</sub>**: No.

Solo sobre los huecos con base hacia abajo o sobre los huecos con la base hacia arriba (depende de la elección que hayan hecho).

## Respuestas del Tema: Apéndice III. Otros polímeros

Pensando en las comidas habituales, ¿qué plato serviría para explicar y visualizar durante un almuerzo o una cena la estructura de un polímero?

**R<sub>III</sub> 1:** Un plato de tallarines.

Espiando a los materiales

## *Espiando a los materiales*

Espiar a los materiales para conocer cómo son en su interior es una aventura fascinante y en este libro comenzaremos a introducirnos en esa aventura.

Así, conoceremos cómo están distribuidos geoméricamente los átomos en metales, en cerámicas y en polímeros; cómo son las fuerzas que mantienen unidos esos átomos; cómo pueden moverse en los cristales y... varias cosas más.

Con estas nociones, y realizando los experimentos y trabajos que se proponen, ya se podrán responder muchas preguntas. Como ejemplos, vayan estas tres:

**¿Por qué queda escrito lo que escribimos con un lápiz?**

**¿Por qué después de estirar una bandita elástica puede volver a su tamaño original?**

**¿Por qué no pasa lo mismo si se estira un trozo de bolsa de supermercado?**

Además, una muy breve mención a diferentes microscopios ópticos, electrónicos, de efecto túnel; una mirada al modelo más sencillo usado para describir el átomo; una guía para “construir” algunas estructuras cristalinas con esferas de poliestireno expandido y escarbadiantes; las instrucciones a seguir para pulir mecánicamente la superficie de un metal y los pasos para medir una mesa y calcular el error en la medición, son temas por los que nos pasea el libro y que contribuyen a que podamos espiar mejor a los materiales. Encontrar los errores en El Juego de los 7 errores, será una comprobación de que han espiado bien!