

Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

Temperatura y Dilatación 4º Año

Física

Evangelista, Ignacio
Duri, Lisandro
Cadierno, Matías
Rodríguez, Iván

Cód. 7402-26



Dpto. de Física

Masterización: RECURSOS PEDAGÓGICOS



Capítulo 3

Temperatura y Dilatación

3.1. Sistemas

Un sistema es una porción del universo que separamos para nuestro estudio. En mecánica el sistema podría ser el proyectil que se arroja; en hidrostática como sistema podríamos adoptar al líquido contenido dentro del recipiente pero también, si la naturaleza del problema lo requiere, el sistema estaría constituido por el líquido, el recipiente y algún otro elemento que puede estar interactuando y que importa al problema en cuestión. Todo lo que no integra el sistema se llama medio o ambiente.

Será de utilidad comenzar clasificando a los sistemas para comprenderlos mejor. Llamaremos:

- Sistema rígido: al de volumen constante.
- Sistema abierto: al que intercambie materia con el medio o con otros sistemas. Si lo hace permanentemente, manteniendo su masa constante, se llama de flujo continuo (la masa que ingresa equivale a la que sale del sistema en el mismo intervalo de tiempo) De lo contrario es discontinuo.
- Sistema cerrado: el que no intercambia materia con el medio o con otros sistemas. Sistema aislado: el que no intercambia ningún tipo de energía (llámese: calor; trabajo) Sistema adiabático: el que no intercambia calor con el medio.

Es importante tener en cuenta que los límites y características del sistema son absolutamente arbitrarios y se adoptan del modo más adecuado al problema en estudio, es frecuente hacer coincidir los límites del sistema con los límites físicos del objeto en estudio, pero esto no siempre es así.

Por ejemplo si se decide estudiar el aire contenido en un globo inflado, es natural hacer coincidir los límites del sistema con la pared interior del globo, pero si lo que se va a analizar son los esfuerzos a que se ve sometido el material del globo por el efecto de las presiones ejercidas desde el interior y desde el exterior, el sistema será el contenido entre la pared interior del globo y la pared exterior del globo.

Un ejemplo de un sistema abierto es un inflador, si se debe estudiar el comportamiento del aire contenido en el interior del mismo tenemos un sistema que a medida que se va comprimiendo el émbolo va reduciendo su volumen y está recibiendo energía que le entrega quién hace el esfuerzo de comprimir el aire.

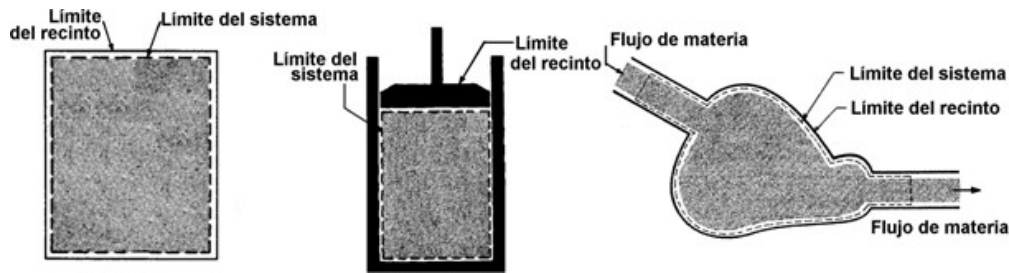


Figura 3.1: Ejemplos de sistemas.

De la Figura 3.1 el primero de los casos es un recinto cerrado, de límites fijos donde el límite del sistema coincide con las caras interiores del recinto. En el segundo caso también se trata de un recinto cerrado pero de límites variables debido al movimiento del pistón y se han elegido los límites del sistema coincidentes con las caras interiores del recinto, pero este sistema es de límites variables. En el tercer caso las paredes del recinto son fijas pero se trata de un recinto abierto y los límites del sistema se han elegido en parte coincidentes con la cara interior del recinto y en parte por donde pasa el flujo de materia.

Los sistemas se caracterizan por un conjunto de variables que son relevantes para su estudio. El ejemplo del globo inflado con aire, puede describirse recurriendo a dos tipos esenciales de variables las microscópicas y las macroscópicas. Las primeras describen el sistema atendiendo justamente a las características microscópicas del mismo. En el ejemplo del globo sabemos que tiene una estructura microscópica complicada, dar las variables microscópicas del sistema es dar las posiciones de todas las moléculas, sus velocidades, sus orientaciones, etc. en el tiempo. Naturalmente esto no es posible, pero recurriendo a procedimientos estadísticos, se puede disponer de un conjunto de variables que brindan información adecuada del comportamiento microscópico del sistema.

A una escala menos detallada, las propiedades del sistema pueden ser suficientemente bien descritas por un pequeño número de variables, las denominadas macroscópicas, tales como el volumen, la masa, la presión, la densidad, el color, la temperatura, el índice de refracción, etc. que contienen la suficiente información para abordar un gran número de situaciones.

Algunas de estas variables como el volumen, el peso o la masa son proporcionales a la cantidad de materia presente y se denominan variables extensivas. Otras variables, como la densidad, el peso específico, la presión, la temperatura o el índice de refracción, no dependen de la cantidad de materia presente y se denominan variables intensivas. Un modo práctico de identificarlas es imaginando que el sistema se divide en dos partes, las variables extensivas, como la masa, se distribuyen con esta partición; en cambio las intensivas, como la temperatura o el color del sistema, permanecen invariables en ambas partes.

Este curso se destinará al estudio de sistemas en equilibrio, esto quiere decir que los valores de las variables que caracterizan al sistema están bien definidos. Trataremos de destacar que se entiende por un valor bien definido de una variable por medio de un ejemplo; si se coloca un recipiente con agua sobre un mechero y se mide la temperatura en distintos puntos veremos que los valores leídos difieren entre sí. Si tenemos valores distintos ¿cuál es el valor a asignar a nuestro sistema en



estudio que es el contenido del recipiente? No se puede asignar ninguno, sólo cuando la temperatura se haya homogeneizado y en todos los puntos del agua haya una misma temperatura estará bien definida y será la temperatura que asignaremos al sistema. Naturalmente, sabemos que en este instante el sistema se encuentra en equilibrio térmico. Este ejemplo vale para todas las variables que se consideren de un sistema; la presión, la densidad, etc. estarán bien definidas cuando el sistema esté en equilibrio o lo que es lo mismo cuando tengan el mismo valor en todos los puntos del sistema.

3.2. Temperatura

Iremos construyendo el concepto de temperatura a lo largo del curso, y esta sección no es más que una introducción al mismo.

Una primera aproximación subjetiva de temperatura nos es dada por el sentido del tacto, que nos indica si un cuerpo está mas o menos frío o mas o menos caliente: el sentido del tacto nos permite decir si una temperatura es mas baja o mas elevada que otra. Esta sensación de temperatura es una manifestación de un fenómeno físico a escala microscópica: el grado de agitación de las moléculas que constituyen el cuerpo. Esta agitación es mayor cuando la temperatura es mas elevada.

Se tratará entonces de definir la temperatura como un parámetro que permita caracterizar el grado de agitación a nivel microscópico. Una manifestación casi directa de esta agitación es la existencia del movimiento browniano. Si se observa al microscopio una gota de agua que contiene en suspensión pequeñas partículas sólidas, con un diámetro del orden de un micrón, se puede ver que estas pequeñas partículas presentan un movimiento de agitación desordenado, llamado movimiento browniano en honor del botánico Brown que lo descubrió en el siglo XIX, sin poder darle una explicación. Hoy sabemos que son las moléculas de agua, invisibles al microscopio, las que colisionan sobre las partículas en suspensión y las mantienen en movimiento irregular y permanente.

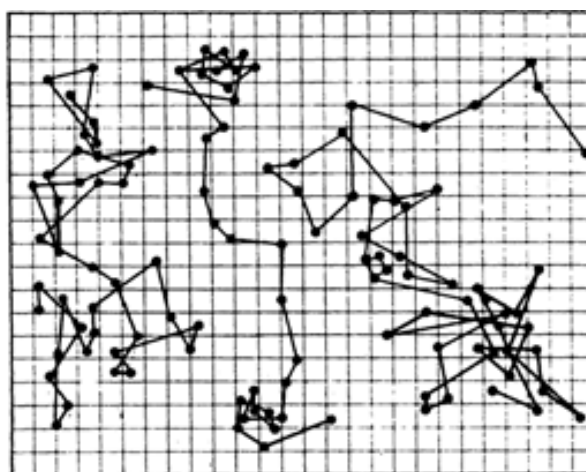


Figura 3.2: : Fotografía de las posiciones sucesivas de tres partículas afectadas por movimiento browniano con exposiciones cada treinta segundos.

El tacto también nos permite verificar que si uno pone en contacto dos cuerpos con diferentes temperaturas, el más caliente se enfría y el más frío se calienta hasta que finalmente las temperaturas de ambos cuerpos se igualan. Esta evolución se manifiesta también por el cambio de otras magnitudes: por ejemplo el cuerpo más caliente se contrae al enfriarse y el más frío se dilata al calentarse. Cuando la evolución termina, se dice que los dos cuerpos están en equilibrio térmico entre sí.

Este equilibrio es consecuencia directa de los choques intermoleculares. Las moléculas con mayor agitación del cuerpo más caliente golpean a las moléculas con menor agitación del cuerpo más frío y les transfieren una parte de su energía. Cuando se alcanza el equilibrio térmico entre los cuerpos, y las moléculas de ambos cuerpos tienen grados de agitación "semejantes". Más adelante se precisará más esta idea de grados de agitación entre moléculas que pueden ser diferentes.

La rapidez con que se produce la transmisión de energía de un cuerpo a otro depende de la naturaleza del material considerado. Ciertas sustancias, tales como el corcho, la lana de vidrio, el poliestireno, la espuma de poliuretano, etc. alcanzan el equilibrio térmico con otros cuerpos muy lentamente. Estas sustancias permiten fabricar paredes denominadas adiabáticas, que prácticamente no transmiten la energía de agitación de un cuerpo a otro. Se puede conservar largo tiempo dos cuerpos a diferente temperatura si están separados por una pared de este tipo. Pueden usarse paredes adiabáticas para aislar un cuerpo del medio exterior. Existen otras sustancias, como el cobre o el aluminio, etc. que permiten la transferencia de energía muy rápidamente; una pared constituida con estas sustancias se denomina diatérmica.

Consideremos un cuerpo A que se pone sucesivamente en contacto con un cuerpo B y luego con otro cuerpo C y se observa que en el primer caso hay equilibrio térmico entre A y B y luego, en el segundo caso que hay otra vez equilibrio térmico entre A y C entonces es posible asegurar que habrá equilibrio térmico entre los cuerpos B y C aunque no se hayan puesto en contacto

Dos cuerpos que están en equilibrio térmico con un tercero están en equilibrio entre sí.

Esta proposición constituye el Principio Cero de la termodinámica (su enunciado explícito se hizo en una época relativamente tardía, cuando el nombre de Primer Principio ya se había utilizado para designar la conservación de la energía). El principio cero no es en realidad un "principio": veremos más adelante que se lo puede explicar a partir de la existencia de una temperatura definida solo por consideraciones macroscópicas. Por el momento vamos a considerar el Principio Cero como un resultado experimental que nos permitirá introducir el concepto de temperatura.

Se dijo que el tacto nos permite distinguir entre dos cuerpos cuál tiene la temperatura más elevada, pero la sensación no sirve para medir, sólo sirve para comparar cualitativamente, para medir la temperatura es necesario establecer una escala y un procedimiento repetitivo para establecer los valores de las mediciones. Para hacerlo se aprovecha que el cambio de temperatura de un cuerpo está siempre acompañada de la variación de ciertas propiedades macroscópicas del mismo, tales como el volumen, la resistencia eléctrica, etc.

Será suficiente definir la temperatura de un sistema particular que denominare-



mos termómetro. La temperatura de un cuerpo cualquiera será entonces definida como la misma que tiene el termómetro cuando el cuerpo y el termómetro están en equilibrio térmico, acá el termómetro sirve para relacionar la temperatura del cuerpo con la del sistema con el que se calibró el termómetro.

Debemos ahora definir la temperatura del termómetro. Para ello se selecciona una variable macroscópica x del termómetro que dependa del estado de agitación molecular. Convendremos en elegir para la temperatura una función determinada $T = f(x)$ de la variable x . Por ejemplo, un termómetro de mercurio está constituido por un bulbo de vidrio, que se conecta con un tubo capilar cerrado, de sección uniforme, por el otro extremo. La variable x es la longitud de la columna de mercurio en el tubo, y la temperatura es la función lineal de la variable x

$$T = mx + h$$

Se pueden determinar los coeficientes m y h a partir de fijar convencionalmente los valores de las temperaturas en dos puntos fijos: el hielo en equilibrio con su líquido se le asigna el valor 0, y al agua hirviendo a la presión atmosférica se le asigna el valor 100. Estos valores se marcan en la columna de vidrio. Como se ha elegido una relación lineal entre la temperatura T y la longitud x de la columna de mercurio, las temperaturas intermedias se obtienen marcando intervalos de igual longitud entre los valores 0 y 100. Se tiene así definida una escala centígrada de temperatura como la desarrollada por Anders Celsius. Se trata de una temperatura empírica ya que queda definida a partir del desarrollo experimental del termómetro y donde la elección de los materiales (mercurio, alcohol, etc.) y de los puntos 0 y 100 es totalmente arbitraria.

No es esta la única escala termométrica que se ha desarrollado, Gabriel Fahrenheit hizo otra escala centígrada asignando el cero a una mezcla frigorífica de hielo y salmuera y el cien a la temperatura del cuerpo humano. Existieron otras escalas termométricas desarrolladas por Réaumur, Rankine y otros autores pero ninguna ha alcanzado el reconocimiento de la escala Celsius.

La escala así obtenida tiene un carácter esencialmente arbitrario. Nada obliga a elegir una relación lineal entre la variable termométrica x y la temperatura T , y aunque nos restringiésemos a una relación lineal se podrían elegir otros valores para los coeficientes. Además, haber elegido como variable termométrica la longitud de la columna de mercurio no tiene nada de fundamental. Más aún si se construye un termómetro con alcohol y se calibra de igual modo con el 0 en el hielo fundente y 100 en el agua en ebullición a presión atmosférica normal y se divide el intervalo en cien partes iguales, ambos termómetros tendrán igual indicación en esos puntos, cero y cien, pero tienen pequeñas diferencias en los valores intermedios. esta es la dificultad principal que se tiene con la temperatura empírica.

3.2.1. Escalas Termométricas

Hasta el momento se ha realizado una presentación de la temperatura; la temperatura empírica, definida a partir propiedades variables de los materiales con la temperatura como la dilatación en el caso del termómetro de mercurio. Este tipo de

Física IV

definición de temperatura, con diversas escalas, se usó durante mucho tiempo y permitió realizar investigaciones que llevaron a encontrar una segunda presentación; la de temperatura absoluta, a partir de la cuál sabemos que hay un cero absoluto de temperatura.

Mientras la temperatura empírica se mide en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), la temperatura absoluta se mide en Kelvin (K) (sin "grados" y sin "cerito").

La escala Kelvin de temperatura, que lleva su nombre en honor a Lord Kelvin (1824-1917), calibra a los termómetros en términos de la energía misma.

Llamaremos cero absoluto a la menor temperatura posible, para la cual su valor en la escala Kelvin es 0 (cero) y en el que la sustancia no tiene energía cinética (movilidad molecular); corresponde a $-273,15^{\circ}\text{C}$. Las unidades de la escala Kelvin tienen el mismo tamaño que los grados de la escala Celsius.

Naturalmente, fue necesario unificar las dos escalas que identifican estas temperaturas. La Conferencia Internacional de Pesas y Medidas, al elaborar el sistema Internacional de Unidades (SI) adoptado en casi todo el mundo, unificó ambas escalas mediante la ecuación:

$$T_C = T_K - 273,15 \quad \text{o} \quad T_K = T_C + 273,15$$

Esto significa que conocido el valor de una temperatura en una de las escalas, para pasar a la otra basta sumar (o restar) una constante. En la resolución de problemas de este curso, para simplificar, se trabajará con el valor de 273 en lugar de 273,15.

En el Sistema Inglés la unidad de temperatura utilizada es el grado Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$). En la Figura 3.3 muestran las relaciones de ésta escala con la Celsius y la absoluta (Kelvin).

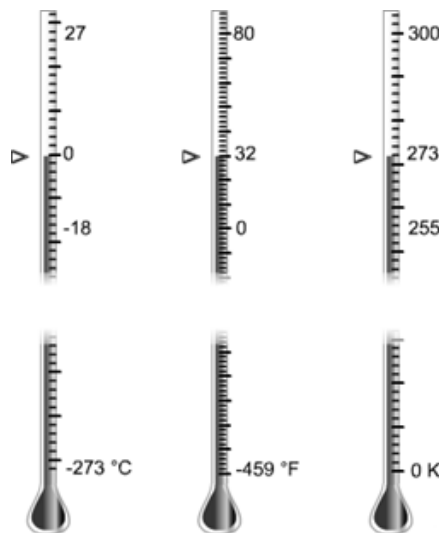


Figura 3.3: Escalas Celsius, Kelvin y Fahrenheit

La conversión entre ambas escalas se realiza según:

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32 \quad \text{o} \quad T_C = (T_F - 32) \frac{5}{9} \quad (3.1)$$



3.3. Dilatación de Sólidos y Líquidos

Los átomos y las moléculas siempre se encuentran sometidos a dos tipos de fuerzas: una de origen gravitatorio, originada por el planeta Tierra y otras de origen eléctrico producido por las interacciones de los electrones y protones que los constituyen. Como estas últimas son de muchos órdenes de magnitud mayor que las gravitatorias, en los estudios de estructura de las sustancias sólo se consideran las fuerzas de origen eléctrico.

En una estructura cristalina, los átomos (y las moléculas) están ligados, como ya se dijo, por fuerzas de origen eléctrico. La energía potencial entre ellas tiene una forma como la indicada en la curva de la Figura 3.4. La curva tiene una pendiente muy pronunciada cuando hay proximidad entre las partículas, lo que indica un aumento de las fuerzas de repulsión cuando estas se aproximan, y una curva con una pendiente más suave para las fuerzas de atracción que intervienen cuando las partículas se separan.

La forma de esta curva indica que para cualquier aumento de energía hay un límite hacia la izquierda que es el punto en que, para cada energía, los átomos pueden estar más próximos. Lo mismo ocurre hacia la derecha. Pero, si la energía es suficiente, los átomos pueden alejarse indefinidamente venciendo a las fuerzas de cohesión. Cuando esto ocurre, la sustancia cambia de fase pasando a fase líquida o gaseosa según corresponda.

Para una determinada energía E_1 , por ejemplo, el átomo se encuentra oscilando alrededor de una posición media r_1 que se encuentra entre el valor máximo r_{1M} y el valor mínimo r_{1m} .

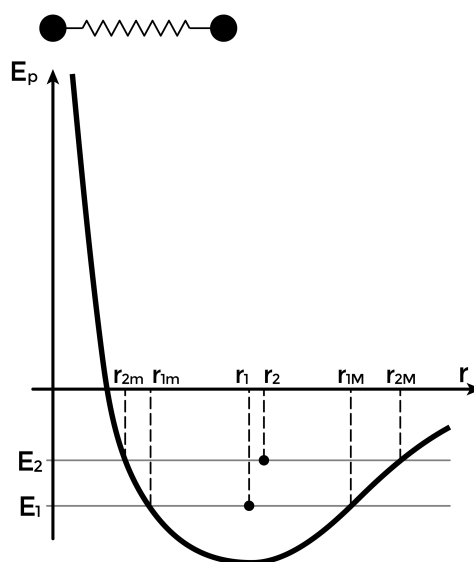


Figura 3.4: Energía potencial y cambio de la posición de equilibrio con el aumento de temperatura

Si la energía que reciben los átomos aumenta, su nivel ascenderá a uno mayor E_2 con un nuevo centro de oscilación r_2 con un valor máximo r_{2M} y mínimo r_{2m} . Como la curva de potencial es siempre asimétrica, la nueva posición r_2 será siempre mayor

Física IV

que r_1 para E_2 mayor que E_1 esto indica que con el aumento de temperatura los átomos se separan.

Como la energía de las partículas está asociada a la temperatura del sistema, todo aumento de temperatura origina un aumento en la distancia media de los átomos. Esto se manifiesta macroscópicamente como un aumento de volumen que se conoce como dilatación de origen térmico.

En general, los cristales son anisótropos: tienen un comportamiento distinto en distintas direcciones debido a que no tienen la misma simetría en todas las direcciones. Cuando se analiza un material macroscópicamente, como puede ser el caso de una barra de metal, lo que se tiene es que los cristales se agrupan en gránulos y estos se distribuyen en la barra al azar con distintas orientaciones. Así, se compensan las distintas contribuciones originadas por las asimetrías de los cristales. De esta manera, en una muestra de material suficientemente grande, los efectos de la dilatación son iguales en todas direcciones.

Por otra parte, como puede observarse de la forma de la curva de potencial, la relación entre la dilatación y el aumento de temperatura no es lineal. No obstante, en la mayoría de los fines prácticos de la ingeniería, siempre que se opere con intervalos de temperatura no muy grandes, se puede considerar una relación lineal, que es lo que consideraremos a continuación.

La mencionada no linealidad también explica por qué dos termómetros con los mismos puntos fijos en cero y cien pero uno de mercurio y otro de alcohol tienen indicaciones diferentes en puntos intermedios.

Todo el análisis anterior tiene validez para sólidos y parcialmente para líquidos si las condiciones de presión no tienen variaciones importantes. Por tal motivo, en lo que sigue analizaremos la dilatación de sólidos y líquidos en condiciones de presión constante o casi constante como lo es la presión atmosférica y considerando que los cambios de temperatura no llegan a la temperatura de cambio de fase.

Como la dilatación de los gases es muy sensible a las variaciones de presión, su estudio requiere una sección particular que se desarrollará más adelante.

3.3.1. Dilatación lineal de sólidos

Cuando aumenta la temperatura, los sólidos dilatan en todas direcciones, esto es, volumétricamente. No obstante, según sean las dimensiones del cuerpo, podemos considerar sólo la dilatación lineal o superficial.

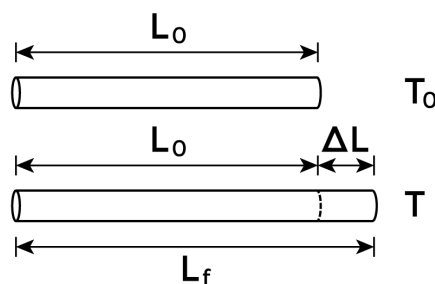


Figura 3.5: Dilatación de una varilla



Para el caso de una barra de sección despreciable frente a su longitud de un material homogéneo (Figura 3.5), si se realiza simultáneamente la medición del incremento de longitud y el incremento de temperatura se tiene para pequeñas variaciones de temperatura que la relación entre el incremento de longitud y el incremento de temperatura está dado por

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta T \quad (3.2)$$

$$l = l_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (3.3)$$

Donde α , que tiene unidades de $^{\circ}\text{C}^{-1}$ o K^{-1} , se llama coeficiente de dilatación lineal y se indica en las tablas con valores alrededor de una cierta temperatura de referencia, generalmente 0°C o 20°C . En la Tabla 3.1 se muestran algunos coeficientes de dilatación lineal.

| Material | α ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) |
|--------------|--------------------------------------|
| Acero | $1,2 \times 10^{-5}$ |
| Aluminio | $2,4 \times 10^{-5}$ |
| Cobre | $1,7 \times 10^{-5}$ |
| Invar | $0,09 \times 10^{-5}$ |
| Latón | $2,0 \times 10^{-5}$ |
| Vidrio común | $0,9 \times 10^{-5}$ |
| Vidrio pirex | $0,36 \times 10^{-5}$ |

Tabla 3.1: Coeficientes de dilatación lineal a 20°C

3.3.2. Dilatación superficial

Se considera a continuación el caso de una lámina rectangular, de espesor despreciable frente a su superficie y de un material sólido isótropo (con comportamiento igual en todas direcciones) para hallar la variación de su superficie con la temperatura.

Si a la temperatura inicial T_0 las dimensiones del rectángulo son respectivamente a_0 y b_0 , la superficie inicial es $S_0 = a_0 b_0$. Cuando el sistema llega a la temperatura final T_f las dimensiones son a y b por lo que la superficie final del sólido es $S = ab$.

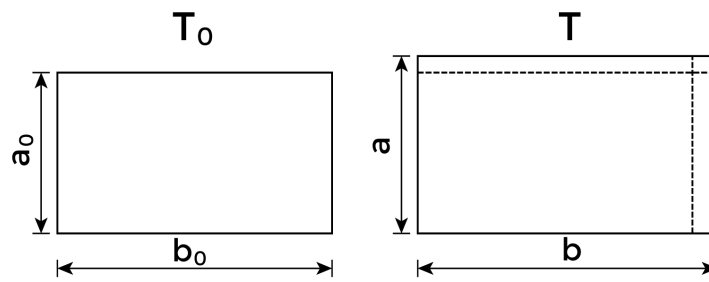


Figura 3.6: Dilatación de una lámina delgada

Considerando que el proceso de dilatación se produce en ambas direcciones de modo lineal, podemos escribir, según se ve en la Figura 3.6:

$$a = a_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$b = b_0(1 + \alpha\Delta T)$$

Por lo tanto la nueva área A resulta,

$$S = a b = a_0(1 + \alpha\Delta T) b_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$S = a_0 b_0 + 2a_0 b_0 \alpha \Delta T + a_0 b_0 \alpha^2 \Delta T^2$$

Pero, como el último término de esta suma es muy pequeño comparado con los otros, puede despreciarse, quedando:

$$S = a_0 b_0 + 2a_0 b_0 \alpha \Delta T = S_0 + 2S_0 \alpha \Delta T$$

$$S = S_0(1 + 2\alpha\Delta T) = S_0(1 + \gamma\Delta T)$$

donde $2\alpha = \gamma$ se denomina coeficiente de dilatación superficial.

3.3.3. Dilatación Volumétrica

Con un razonamiento similar al anterior se llega a una expresión de la dilatación del volumen que es:

$$V = V_0(1 + \beta\Delta T) \tag{3.4}$$

con $\beta = 3\alpha$ es el coeficiente de dilatación volumétrica.

Algunos valores de coeficientes de dilatación volumétrica se pueden encontrar en la Tabla 3.2.



| Material | β ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) |
|-----------|-------------------------------------|
| Acetona | 149×10^{-5} |
| Agua | 21×10^{-5} |
| Benceno | 124×10^{-5} |
| Etanol | 75×10^{-5} |
| Glicerina | 49×10^{-5} |
| Mercurio | 18×10^{-5} |

Tabla 3.2: Coeficientes de dilatación volumétrica a 20 °C

Dilatación de líquidos

Debido a que las fuerzas de atracción entre las moléculas de los líquidos son mucho menores que las de los sólidos, cuando aumenta su temperatura, tienen en general mayor dilatación que los sólidos.

Esto es lo que ha permitido construir los termómetros de vidrio con su contenido líquido. Como el mercurio o el alcohol dilata más que el vidrio, se aprecia la variación en la columna. Si ambos dilatasen igual, no se apreciaría variación en la columna de líquido con la variación de temperatura.

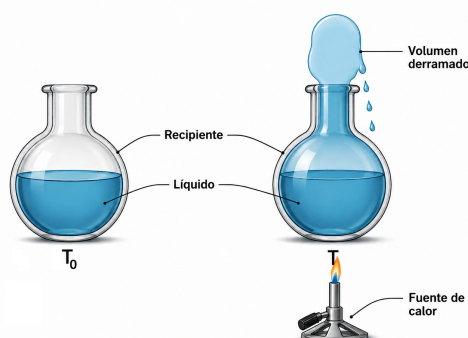


Figura 3.7: El volumen derramado se obtiene a partir del cálculo de la dilatación del recipiente y del contenido

Como los líquidos están siempre contenidos en un recipiente y es inevitable que los cambios de temperatura afecten a ambos, en consecuencia debemos considerar la dilatación volumétrica tanto del recipiente como del líquido.

Consideremos el problema de un recipiente que a la temperatura inicial T_0 está lleno hasta el borde de líquido. ¿Cuánto líquido se derramará a una temperatura $T > T_0$?

El líquido desalojado no representa la diferencia entre los volúmenes inicial y final del mismo, porque el recipiente también se ha dilatado. Para calcularlo, se determinan los volúmenes finales de líquido y de recipiente.

El volumen final del líquido es:

$$V_{liq} = V_{0liq} (1 + \beta_{liq} \Delta T)$$

Física IV

El volumen final del recipiente es:

$$V_{rec} = V_{0_{rec}} (1 + \beta_{rec} \Delta T)$$

El líquido derramado V_D resulta de la diferencia entre ambos volúmenes (siempre y cuando la diferencia sea positiva, si no, no se derrama nada):

$$V_D = V_{liq} - V_{rec}$$

$$V_D = V_{0_{liq}} (1 + \beta_{liq} \Delta T) - V_{0_{rec}} (1 + \beta_{rec} \Delta T)$$

$$V_D = V_{0_{liq}} - V_{0_{rec}} + V_{0_{liq}} \beta_{liq} \Delta T - V_{0_{rec}} \beta_{rec} \Delta T$$

Dado que el recipiente inicialmente estaba lleno, podemos escribir $V_{0_{liq}} = V_{0_{rec}} = V_0$ y entonces:

$$V_D = V_0 (\beta_{liq} - \beta_{rec}) \Delta T \tag{3.5}$$

el término $\beta_{liq} - \beta_{rec}$ se denomina coeficiente de dilatación aparente β_{ap} . Vale destacar que la Ecuación (3.5) solo es válida cuando los volúmenes iniciales son iguales (es decir, cuando el recipiente se encuentra inicialmente lleno de líquido); en el caso de que esto no ocurra, debe calcularse el volumen derramado como la diferencia entre los volúmenes finales.

3.3.4. Dilatación de orificios y cavidades

Cuando una chapa se dilata lo hace en todas direcciones, pero, ¿qué ocurre cuando esta chapa tiene un orificio? ¿éste se dilata o por el contrario se contrae? Ocurre que la dilatación actúa hacia “afuera” y el orificio también aumenta sus dimensiones (Figura 3.8).

Otro modo de ver el fenómeno es imaginar que se hace un corte circular en la chapa y se extrae un disco y luego se eleva la temperatura de ambos: la chapa con el orificio y el disco. Cuando ambos lleguen a la misma temperatura debe ser posible volver a colocar el disco dentro del orificio de la chapa, para que esto sea posible el orificio también se tiene que haber dilatado. El mismo tipo de razonamiento vale para la dilatación de las cavidades.

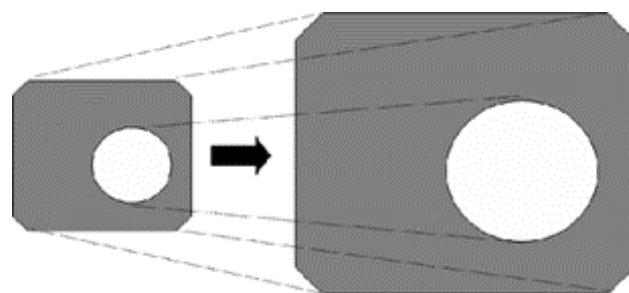


Figura 3.8: Dilatación de un orificio en una chapa



3.3.5. Aplicaciones de la dilatación de sólidos

La dilatación de los materiales da lugar a dificultades en algunas situaciones y ventajas en otras. Analizaremos primero alguna de las aplicaciones útiles en que se los emplea.

Par bimetálico

Consiste en dos barras de metales distintos adosados uno a otro por medio de remaches o de soldadura. Como son materiales distintos cuando cambia la temperatura respecto de la de unión, una de las barras se deforma más que la otra y en consecuencia el sistema se deforma curvándose hacia un lado si aumenta la temperatura y hacia el otro si disminuye. Se trata de dispositivos comparativamente económicos y se lo emplea como reguladores de temperatura en muchos dispositivos domiciliarios como planchas, hornos, calefactores, etc. Con ellos se construye la mayoría de los termómetros de los hornos de cocina ya que resultan muy económicos, aunque no son instrumentos precisos. En la Figura 3.9 se muestra el esquema de uno de estos termostatos que conecta y desconecta un circuito eléctrico según sea la temperatura.

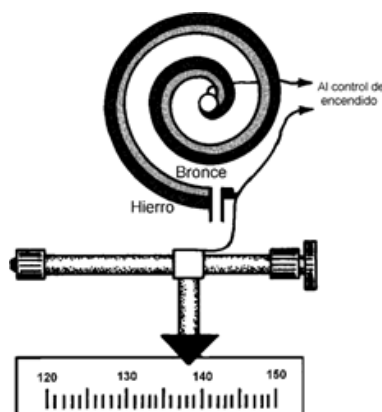


Figura 3.9: Un par bimetálico está formado por dos materiales que tienen diferente coeficiente de dilatación

Roblonado en caliente

Durante mucho tiempo se han construido grandes estructuras metálicas uniendo las piezas con roblones (grandes remaches) que se aplicaban calientes, cuando se enfriaban la contracción que sufría el remache unía aún más las piezas. Esto adquiriría gran importancia en el caso de las calderas porque limitaba la posibilidad de una fuga de vapor. Este tipo de unión por roblonadura es común verlo aún en los puentes ferroviarios que tienen más de cien años. Desde hace más de medio siglo este método de unión se ha reemplazado por la soldadura.

Inconvenientes de la dilatación de los sólidos

Cuando se realizan construcciones se debe tener en cuenta que los materiales que se emplean tienen variaciones en sus dimensiones por efecto de los cambios de temperatura y prever sus consecuencias. Así los puentes, por ejemplo, se diseñan montando un extremo sobre rodillos para permitir su dilatación, las calles y carreteras de hormigón se hacen en placas de tamaño limitado separadas por una junta que se suele llenar de alquitrán para permitir la dilatación de las mismas.

En las tuberías industriales de conducción de agua caliente, gas o vapor a elevadas temperaturas, se introducen de trecho en trecho sistemas que permitan la dilatación y contracción evitando así daños.

En los instrumentos de medida se debe tener especial cuidado por los efectos de la dilatación, para limitarlo, por ejemplo las cintas de medición de largas longitudes empleadas por agrimensores se construyen de aleaciones de bajo coeficiente de dilatación como el Invar.

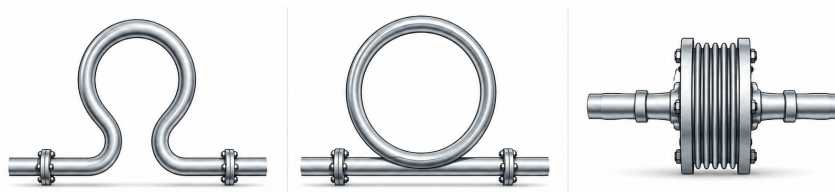


Figura 3.10: Distintos tipos de juntas de dilatación para tuberías sometidas a cambios de temperatura

3.3.6. Dilatación anómala del agua

Como ya se dijo, la dilatación de las sustancias no es lineal con la variación de la temperatura. En algunos casos, la dilatación tiene características muy especiales, una de estas situaciones se tiene con el agua. La importancia que el comportamiento del agua tiene en general en nuestra vida amerita una breve descripción de su comportamiento.

Aunque la mayor parte de los materiales se dilatan cuando se calientan, el comportamiento del agua a las temperaturas comprendidas entre 0°C y 4°C es una excepción importante. El agua tiene una dilatación creciente (aumento de volumen) con la temperatura a partir de los 4°C , pero por debajo de esa temperatura, hasta llegar a 0°C su volumen aumenta. A 0°C se produce el cambio de fase de líquido a sólido con un aumento de volumen.

Como el agua se dilata al pasar a fase sólida, los recipientes con agua puestos en el congelador pueden estallar o les pueden saltar los tapones por la presión que ejerce el hielo sobre las paredes. En las instalaciones industriales que se encuentran en zonas frías se deben proteger las tuberías de agua ya que si el agua se congela en su interior, se deterioran por la aparición de grietas y fisuras o simplemente porque estallan.

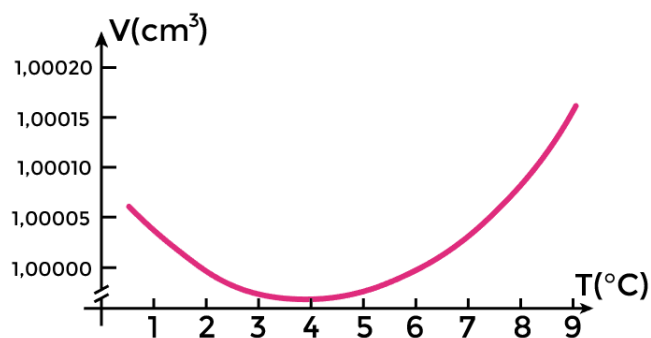


Figura 3.11: Dilatación anómala del agua

Como se observa en la Figura 3.11, a 4°C el volumen del agua es mínimo y por lo tanto la densidad es máxima ($\delta = m/V$). Así, cuando se calienta agua que está por debajo de 4°C se contrae en lugar de dilatarse.

Por otra parte el agua es una de las pocas sustancias en que ocurre que la fase sólida flota en la líquida (el agua en estado sólido es menos densa que el agua en estado líquido). En general, todas las sustancias tienen la característica que su fase sólida se hunde en su líquido. Esto tiene importancia también para la vida animal. En invierno, los ríos y lagos sólo se congelan en la superficie. Esto ocurre de la siguiente manera: a medida que comienza a bajar la temperatura las capas superiores de agua de los lagos comienzan a enfriarse y aumentan su densidad descendiendo al interior del lago y permitiendo que se produzca una corriente ascendente de agua más caliente que cuando llega a la superficie comienza a enfriarse para luego descender y así sucesivamente. Este proceso continúa hasta que la temperatura de las capas superiores llega a 4°C . A partir de esa temperatura, toda disminución de temperatura originará un aumento de volumen del agua y en consecuencia una disminución de densidad por lo que las capas más frías permanecerán en la superficie y seguirán enfriándose hasta llegar al congelamiento.

Cuando la capa superior del lago se congela, el hielo, que es un buen aislante, protege al interior del lago. Este permanece todo el invierno a una temperatura de alrededor de 4°C , permitiendo la conservación de la vida acuática. Si el agua tuviese un comportamiento similar a la mayoría de las sustancias, en invierno se congelarían totalmente los ríos y arroyos no permitiendo la permanencia de la vida acuática.

Problemas y Cuestiones

Temperatura

Problemas

1. Para cada una de las siguientes temperaturas, hallar la temperatura equivalente en la escala indicada:

- a) $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la escala Fahrenheit
- b) $98,6\text{ }^{\circ}\text{F}$ en la escala Celsius
- c) 77 K en la escala Celsius
- d) $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la escala Kelvin

R) a) $-459,67\text{ }^{\circ}\text{F}$, b) $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, c) $-196,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, d) $310,15\text{ K}$

2. Una cacerola se coloca al fuego y el agua que contiene se calienta de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$

- a) ¿Cuál es su cambio de temperatura en Celsius?
- b) ¿Cuál es este cambio medido en la escala Kelvin y en la escala Fahrenheit?
- c) ¿Qué podemos concluir sobre el valor de una variación de temperatura en escala Celsius y en escala Kelvin?

R) a) $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, b) $\Delta T_K = 55\text{ K}$ y $\Delta T_F = 99\text{ }^{\circ}\text{F}$, c) Una variación de temperatura medida en la escala Kelvin tendrá el mismo valor en la escala Celsius

3. En un depósito de la Base Marambio, ubicada en la Antártida, hay dos termómetros midiendo la temperatura ambiente, uno en la escala Celsius y otro en la escala Fahrenheit. Para su sorpresa, un observador nota que ambos termómetros miden en ese momento el mismo valor de temperatura. Sabiendo que los termómetros funcionan correctamente, ¿es esto posible? ¿qué temperatura hace entonces?

R) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

4. Hasta 1954, la Conferencia Internacional de Pesas y Medidas utilizaba dos puntos fijos como método de calibración de los termómetros: uno, el punto de fusión del hielo a presión normal (se le asignaba el valor $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), y el otro, el punto de ebullición del agua a presión normal (se le asignaba el valor $100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Luego, entre esos dos puntos, se establecía la escala de cero a cien y se la dividía entre cien partes iguales.

Se desea calibrar un termómetro de columna de mercurio por este método. La temperatura T estará relacionada con la longitud L de la columna por:

$$T = \alpha L + \beta$$



donde α representa la pendiente de la recta y β la ordenada al origen.

La longitud de la columna de mercurio del termómetro es de 4 cm cuando este se sumerge en una mezcla de agua y hielo en equilibrio, y de 24 cm cuando se lo coloca en agua en ebullición (en ambos casos a presión atmosférica normal).

- a) En función de los datos, determine los valores de las constantes α y β y trace una gráfica de la temperatura en función de la longitud.
- b) ¿Cuál será la longitud de la columna de mercurio cuando el termómetro se coloca en una habitación que se encuentra a 22°C ?
- c) La columna de mercurio mide 25,4 cm cuando el termómetro se introduce en una solución química hirviendo ¿Cuál es la temperatura de la solución?

R) a) $\alpha = 5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{cm}}$ y $\beta = -20^\circ\text{C}$, b) 8,4 cm, c) 107°C

Dilatación

Problemas

1. La longitud de un puente de acero ($\alpha_{\text{acero}} = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) es aproximadamente de 750 m a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Calcula la diferencia entre sus longitudes un día de invierno en que la temperatura es $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ y día de verano en que la temperatura es $30 \text{ }^\circ\text{C}$.
R) 0,315 m
2. Rieles de acero ($\alpha_{\text{acero}} = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) de 35 m de longitud se colocan con sus extremos en contacto un día en que la temperatura es $31 \text{ }^\circ\text{C}$. ¿Qué espacio habrá entre ellos otro día en que la temperatura sea de $0 \text{ }^\circ\text{C}$?
R) 0,013 m
3. *Una cinta métrica de acero ($\alpha_{\text{acero}} = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) de 18,000 m está construida para trabajar a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Se mide con esa cinta un día de verano a $38 \text{ }^\circ\text{C}$ la distancia entre dos puntos, que resulta ser 16,330 m. ¿Cuál será la distancia correcta?
R) 16,334 m
4. Un anillo de acero ($\alpha_{\text{acero}} = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) de 75 cm de diámetro interior a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ha de introducirse en un eje de latón ($\alpha_{\text{latón}} = 2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) de 75,05 cm de diámetro de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - a) ¿a qué temperatura debe calentarse el anillo?
 - b) Si anillo y eje se enfrían juntos por algún procedimiento, tal como introducirlos en aire líquido, ¿a qué temperatura saldrá el anillo solo del eje?
*Nota: despreciar los efectos de deformación cuando el eje está en el interior del anillo y se enfrían juntos.*R) a) $75,5 \text{ }^\circ\text{C}$, b) $-63,19 \text{ }^\circ\text{C}$
5. Un eje de acero ($\alpha_{\text{acero}} = 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) tiene un diámetro de 10,000 cm a $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Calcula la temperatura que deberá alcanzar para que encaje perfectamente en un agujero de 9,997 cm de diámetro.
R) $2,727 \text{ }^\circ\text{C}$
6. Un alambre de 60 cm se dobla en forma de anillo circular, dejando una hendidura de 1,000 cm. Se aumenta uniformemente la temperatura del alambre en $100 \text{ }^\circ\text{C}$. A la nueva temperatura se encuentra que la hendidura tiene 1,002 cm ¿Cuál es el coeficiente de dilatación lineal del alambre?
R) $2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}$
7. Una varilla metálica de 30 cm de longitud se dilata 0,075 cm al elevar la temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ a $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Una varilla de metal distinto, e igual longitud, se dilata 0,045 cm para la misma elevación de temperatura. Con un trozo de cada uno de los metales anteriores, uno a continuación del otro, se construye una tercera varilla de igual longitud que las anteriores, la cual se dilata 0,065 cm entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ y $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Calcula la longitud de cada trozo.



R) 20 cm y 10 cm, respectivamente

8. Un frasco de vidrio cuyo volumen es exactamente 1000 cm^3 a 0°C se llena completamente de mercurio a esta temperatura. Cuando frasco y mercurio se calientan a 100°C se derraman $15,2 \text{ cm}^3$ de líquido. Si el coeficiente de dilatación cúbica del mercurio es $0,000182^\circ\text{C}^{-1}$. Calcula el coeficiente de dilatación lineal del vidrio.

R) $\alpha_v = 1 \times 10^{-5}^\circ\text{C}$

9. A la temperatura de 20°C el volumen de cierto matraz de vidrio, hasta una señal de referencia que lleva en el cuello, es exactamente 100 cm^3 . Se llena el matraz hasta dicha señal con un líquido cuyo coeficiente de dilatación cúbica es $120 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$; estando tanto el matraz como el líquido a 20°C . El coeficiente de dilatación lineal del vidrio, es $8 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$. La sección transversal del cuello es 1 cm^2 . ¿Cuánto ascenderá o descenderá el líquido en el cuello, cuando la temperatura se eleve hasta 40°C ?

R) ascenderá 2,352 cm

10. Un frasco de vidrio lleno a la temperatura de 20°C contiene 680 g de mercurio. ¿Cuánto mercurio se derrama si el conjunto se calienta hasta 100°C ? ($\alpha_{\text{vidrio}} = 8 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ y $\delta_{\text{Hg}} = 13,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)

R) $0,632 \text{ cm}^3$

11. *Un recipiente de vidrio de coeficiente de dilatación lineal $8 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ tiene a 0°C , un volumen interno de 40 cm^3 . Calcula el volumen de mercurio que es necesario colocar en el recipiente a fin de que el volumen de la parte vacía no se altere al variar la temperatura. El coeficiente de dilatación cúbica del mercurio es $182 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$.

R) $5,3 \text{ cm}^3$

Cuestiones

- A. Una esfera de metal puede pasar por un orificio practicado en una chapa de acero si ambos están a temperatura ambiente. Sin embargo cuando se calienta la esfera no pasa por el orificio de la chapa. Se decide realizar un experimento y se mantiene a temperatura ambiente la esfera y se calienta la chapa. ¿pasará la esfera por el orificio?
- B. Manteniendo iguales todas las demás condiciones, ¿el cambio de volumen de un cuerpo cuando aumenta su temperatura depende de si el cuerpo tiene cavidades en su interior?. Considere como ejemplo una esfera sólida y otra hueca.
- C. Se mide la longitud de una varilla de madera con una regla metálica de precisión graduada. ¿Cuando medirá más, en invierno o en verano?
- D. ¿Qué es lo que hace que, en algunos países muy fríos, el agua reviente las tuberías durante el invierno?