

GENERALIDADES

El vidrio, tal y como lo entendemos nosotros, ha sido definido como una mezcla –o tal vez *disolución*– compleja de diferentes elementos y sílice, en estado amorfo, posiblemente debido a un enfriamiento rápido, que lo convierte en un *líquido subenfriado*.

Para su obtención industrial es necesario mezclar, con un cierto grado de intimidad, un conjunto de materias primas pulvulentas formadas por arena silíceas y carbonatos de sodio, potasio, calcio y magnesio, fundamentalmente. Esta mezcla de materias minerales debe reaccionar (a velocidades apreciables y, evidentemente, cuanto mayores mejor) para formar el conjunto de silicatos que, combinados y mezclados, darán lugar a esa sustancia a la que llamamos *vidrio*.

La naturaleza exacta de las reacciones que tienen lugar entre las diferentes materias primas sólidas, líquidas o semilíquidas, ha sido el objeto de muchos y complejos trabajos de investigación, si bien todavía hoy no puede darse una verdadera secuencia de reacciones que refleje con fidelidad lo que realmente ocurre en un reactor elaborando vidrio líquido. Sabemos la naturaleza física y química de las materias originales, podemos conocer la proporción exacta de los elementos que componen el vidrio final, la estructura íntima aproximada de ese vidrio y muchas de sus propiedades físicas y químicas, pero de lo que ocurre entre estos dos estados – materias primas y vidrio terminado– podemos decir sin exagerar, que es casi un misterio.

Para elaborar una cierta masa de vidrio es preciso aportar energía en cantidades no despreciables. Las razones de ello pueden ser resumidas en tres grupos:

- 1ª) Las reacciones a temperatura ambiente de las materias primas húmedas entre sí, dan una resultante endotérmica, que supone entre unas **150 a 210 Kcal/Kg** de vidrio, según sea su composición y naturaleza de las materias primas.
- 2ª) Si bien el potencial químico de las materias primas, en relación con el producto de sus reacciones, indica un claro desplazamiento de estas hacia la formación del vidrio (constante de equilibrio), las velocidades de reacción, a temperatura ambiente (tomemos como temperatura *tipo 25 °C*) son prácticamente nulas. Ello se debe, a su vez, a dos razones:
 - a) Las materias primas a 25°C se encuentran en estado sólido cristalizado, lo que impide un contacto lo suficientemente íntimo como para producirse cambios químicos a velocidades apreciables.
 - b) A esas temperaturas, las energías de activación son muy pequeñas.

Con el fin de aumentar estas velocidades a valores industrialmente rentables (productividad del reactor de elaboración del vidrio), se calienta la llamada *mezcla vitrificable* de materias primas, para:

- I) Fundir las de menor punto de fusión (sales de sodio y potasio tales como carbonatos y sulfatos), y así crear una fase líquida envolvente de las materias de mayor punto de fusión (la sílice y otras), para obtener un contacto más eficaz entre los reactivos.
- II) Aumentar las velocidades de reacción (*ley de Arrhenius*).
- III) Favorecer el desprendimiento de los gases resultantes –que de quedarse en el vidrio elaborado degradarían su calidad– así como provocar corrientes convectivas en la masa del reactor de elaboración del vidrio, imprescindibles tanto para activar los intercambios caloríficos necesarios, como para homogeneizar la masa del vidrio recién formado.

Todo ello exige temperaturas que, para vidrios industriales, pueden oscilar entre los 1.400°C y los 1.600°C. Dado el calor específico de esos vidrios, para conseguir estas temperaturas es preciso conferirles del orden de 440 Kcal/Kg de vidrio.

3ª) Una vez elaborada una masa el vidrio, es preciso darle una forma determinada, en función del producto final que se desea producir:

- ◆ *Placa perfectamente plana, de espesor determinado, con superficies lisas ("luna pulida") o no ("vidrio impreso").*
- ◆ *Formas huecas, para contener sustancias (envases en general, botellas, frascos, etc.).*
- ◆ *Fibras finas y resistentes para el refuerzo de otros materiales tales como polímeros orgánicos, cementos, etc.*
- ◆ *Fibras finas y de forma algodonosa, para la constitución de volúmenes de material aislante al paso del calor y ruido.*
- ◆ *Formas más o menos complicadas, para objetos culinarios, de mesa, iluminación, decoración ...*
- ◆ *Etc.*

Para conformar una masa de vidrio, es necesario que se pueda deformar sin que sufra menoscabo su resistencia mecánica, ni se fracture. Ello sólo es posible si se encuentra en un estado plástico adecuado, es decir, presenta una cierta *viscosidad*. Generalmente, la viscosidad adecuada para ello se sitúa entre los 900 poises y los 3.000 poises, lo que supone, dadas las curvas de viscosidad-temperatura de los vidrios industriales (Figura 1) unas temperaturas *de trabajo* del orden de los

1.100°C a 1.200°C. Puesto que hemos tenido que partir de una masa de vidrio a unos 1.400°C, esto supone que desde la elaboración química del vidrio hasta su conformación, ha sido preciso enfriarlo del orden de 300°C, es decir, recuperar cerca de 100 Kcal/Kg.

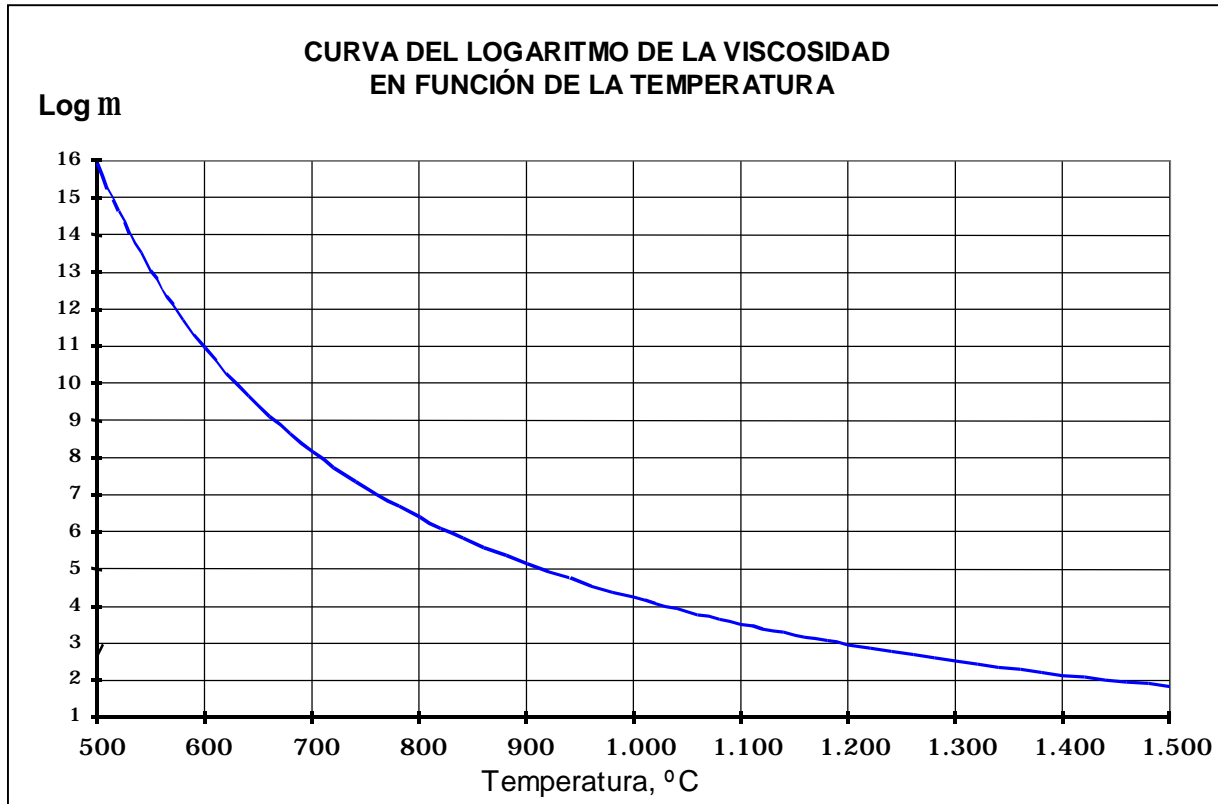


Figura 1

Con todo ello, nos encontramos con que un reactor de elaboración de vidrio, es un recipiente sometido a temperaturas superiores a los 1.400°C, y al que hay que comunicar una cierta cantidad de calor que, como mínimo, será del orden de las 600 Kcal/Kg de vidrio obtenido.

A un reactor así se le suele denominar *HORNO*.

0.1.- VIDRIOS INDUSTRIALES

Se conocen por este nombre a un conjunto de vidrios de uso común para fines que podríamos calificar de ordinarios, como pueden ser:

- ◆ de tipo doméstico (servicios de cocina y mesa, cosmética, etc.)
- ◆ construcción de edificios (partes transparentes y/o traslúcidas, ventanas, decoración, etc.)
- ◆ automóviles (acristalamiento, reforzamiento de resinas para partes de su carrocería, etc)
- ◆ envases de todo tipo (industria alimentaria, cosmética y perfumería, farmacia, etc.)
- ◆ otros múltiples usos, industriales, semi-industriales y decorativos...

Las propiedades que caracterizan a estos diferentes vidrios dependen, de manera casi exclusiva, de su composición química, que a todos los efectos prácticos y de manera internacionalmente admitida, se expresa en términos de *tanto por ciento* en peso del óxido más común y/o estable de cada uno de los elementos que componen ese vidrio, además claro está, del propio Oxígeno.

Las composiciones de estos vidrios comunes, también llamados *industriales*, se sitúan en un entorno que podemos resumir según la siguiente tabla:

Óxido del elemento	Intervalo, en % en el vidrio
SiO ₂	68,0 - 74,0
Al ₂ O ₃	0,00 - 4,0
Fe ₂ O ₃	0,00 - 0,45
CaO	9,00 - 14,0
MgO	0,00 - 4,0
Na ₂ O	10,0 - 16,0
K ₂ O	0,00 - 4,0
SO ₃	0,00 - 0,3

Además de pequeñas cantidades de elementos llamados *colorantes*, tales como *Se, Fe, Cr, Mn, Co, Ni, V*, y otros elementos de los denominados químicamente "*de transición*".

1.- LAS PROPIEDADES DEL VIDRIO

1.1.- PROPIEDADES GENERALES

Han sido muchos los hombres de ciencia, muy particularmente en la primera mitad del siglo XX, que han intentado establecer correlaciones entre lo que ellos llamaban la “estructura interna del vidrio” –generalmente basada en unas teorías atómicas, bastante primitivas, por cierto– y las propiedades físicas observadas en los vidrios [1.2].

Producto de estos estudios fueron un conjunto de relaciones, de naturaleza absolutamente empírica, que representan de manera sorprendentemente precisa muchas de esas propiedades mediante relaciones lineales entre el contenido de los elementos químicos que forman un vidrio determinado, expresado bajo la forma del contenido porcentual en peso de sus óxidos más estables, y la magnitud representando dicha propiedad. Ni que decir tiene que la exactitud de estas correlaciones deja en evidencia a muchos de los defensores de la *teoría de la estructura interna atómica* de los vidrios.

A continuación se adjuntan unas tablas en las que se expresa un conjunto de esas relaciones para las propiedades físicas y químicas más necesarias para la explotación industrial de los vidrios.

CÁLCULO DE ALGUNAS PROPIEDADES DE VIDRIOS PARA ENVASES
EN FUNCIÓN DE SU COMPOSICION QUÍMICA
TABLA I

PROPIEDAD	OBSERVACIONES	FUENTE	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA
Dilatación térmica	.(1)	Winkelmann & Schott	Ann. Physik 51 (1894) 730-746
Tensión superficial	.(2)	Rubestein	Glass Technol. 5 (1964) 1, 36-40
Densidad o peso específico	.(3)	Gilard & Dubrul	Verres. Silic. Ind. 9 (1938) 25-28; 37-39; 50-52
Índice de refracción	(4)		
Módulo de Poisson	(5)	Winkelmann & Schott	Ann. Physik. 51 (1894) 697
Módulo de elasticidad	(6)	Appen	Zh. Prikl. Khim. 34 (1961) 975-981
Resistencia mecánica	Tracción (Extensión)(7)	Winkelmann & Schott	Ann. Physik. 51 (1894) 697
Constante dieléctrica	(9)	Appen & Bresker	Zh. Tekh. Fiz. 22 (1952) 946-954
Calor específico (y Entalpía)	(10)	Sharp & Ginter	J. Amer. Ceram. Soc. 34 (1951) 260-271
Viscosidad	Temp(log $\mu=)$ 2	Rodríguez Cuartas (CIDA)	Ceram. Vidrio 23 (1984) 105-111
	2,5		
	3		
	3,5		
	4		
	4,5		
	5		
	5,5		
	6		
	("Softening point") 7,6		
	("Annealing point") 13		
	("Straing point") 14,5		
Desvitrificación	.(13a)		
TSD			
	TVM		
	VM		
Atacabilidad	(14a) hasta (14d)		

CÁLCULO DE ALGUNAS PROPIEDADES DE VIDRIOS PARA ENVASES
EN FUNCIÓN DE SU COMPOSICION QUÍMICA
TABLA II

(1) Dilatación

Winkelman & Schott

$$a_{(20 \text{ a } 100 \text{ } ^\circ\text{C})} = \frac{1}{10} \sum (a_i \cdot \%p_i) \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

(2) Tensión superficial

Rubenstein

$$s_{(1.300^\circ\text{C})} = \frac{1}{10} \sum (a_i \cdot \%p_i) \text{ dinas/cm}$$

(3) Densidad

Gilard & Dubrul

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{100} \sum (a_{1i} \cdot \%p_i + a_{2i} \cdot \%p_i^2) \text{ g/cm}^3$$

(4) Índice de refracción

Gilard & Dubrul

$$n = \frac{1}{100} \sum (a_{1i} \cdot \%p_i + a_{2i} \cdot \%p_i^2)$$

(5) Módulo de Poisson

Winkelman & Schott

$$m = \frac{1}{100} \sum (a_i \cdot \%p_i)$$

(6) Módulo de elasticidad

Appen

$$E = \sum (a_i \cdot \%m_i) \text{ Kbar}$$

(7) Resistencia mecánica

Winkelman & Schott

A la tracción

$$Rt = \frac{1}{100} \sum (a_i \cdot \%p_i) \text{ Kgf/cm}^2$$

A la compresión

$$Rc = \frac{1}{100} \sum (a_i \cdot \%p_i) \text{ Kgf/cm}^2$$

(9) Constante dieléctrica

Appen & Bresker

$$\epsilon_{(4,5 \cdot 10^8 \text{ Hz})} = \frac{1}{100} \sum (a_i \cdot \%m_i)$$

(10) Entalpía

Sharp & Ginter

$$H = \frac{10^{-2} \cdot T \cdot \sum a_{1i} \cdot \%p_i + \sum a_{2i} \cdot \%p_i}{1 + 0,00146 \cdot T} 10^{-6} T, \text{ cal/g}$$

(10') Calor específico a presión constante

Sharp & Ginter

$$C_p = \frac{1,46 \cdot 10^{-11} \cdot T^2 \cdot \sum a_{1i} \cdot \%p_i + 0,02 \cdot T \cdot \sum a_{1i} \cdot \%p_i + \sum a_{2i} \cdot \%p_i}{(1 + 0,00146 \cdot T)^2} 10^{-6}, \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

(12) Viscosidad

Rodríguez Cuartas (C.I.D.A.) $\log [\mu(T)] = \frac{1}{\%SiO_2} \sum a_i(T) \cdot \%p_i, \log(\text{poises})$

(13) Desvitrificación.-

(13a) Rodríguez Cuartas (C.I.D.A.) $T.S.D. = \frac{1}{\%SiO_2} \sum a_i \%p_i \text{ } ^\circ\text{C}$

(13b) Rodríguez Cuartas (C.I.D.A.) $T.V.M. = \frac{1}{\%SiO_2} \sum a_i \%p_i \text{ } ^\circ\text{C}$

(13c) Rodríguez Cuartas (C.I.D.A.) $V.M. = \frac{1}{\%SiO_2} \sum a_i \%p_i \text{ mm/min}$

(14) Resistencia hidrolítica superficial.-

Rodríguez Cuartas (C.I.D.A.)

$$A = \frac{1}{100} \sum a_i \cdot \% p_i$$

(14a) Alcalinidad DGG en	mg Na ₂ O/100ml
(14b) Extracto seco 1.100°C DGG en	mg/100ml
(14c) Atacabilidad DIN 12111 en	ml CIH/g
(14d) Atacabilidad superficial en	ml CIH 0,01N/100ml

(15) Resistividad eléctrica

$$\log \rho = \frac{k_1}{273,15+T} + k_2$$

$$\log r(1.500^\circ\text{C}) = 1,130 + \sum a_{1i} \%p_i \text{ W}\cdot\text{cm}$$

$$\log r(1.100^\circ\text{C}) = 1,600 + \sum a_{2i} \%p_i \text{ W}\cdot\text{cm}$$

NOTA: Cuando en la fórmula se indica la proporción del componente con una p_i , significa composición **porcentual de óxido**. Cuando es una m_i es proporción **% molar**

Los coeficientes que figuran en estas formulas, función de cada uno de los componentes considerados del vidrio, se detallan en las tablas que se dan al final de este estudio, en anexo.

1.2.- EL CALOR DE FORMACIÓN

Como ya quedó dicho, se desconoce qué reacciones se producen a cada temperatura y en cada zona de un horno de elaboración de vidrio, tanto entre fases líquidas, como sólidas y gaseosas. Lo único que conocemos es su temperatura, la composición química de las materias que introducimos en el horno, y que una vez alcanzada una cierta temperatura, fijada por la cinética química de estas materias, dispondremos de una masa de vidrio de composición muy compleja, que suponemos perfectamente homogeneizada físicamente, y a la que designaremos con el nombre genérico de *vidrio fundido*.

Acudiendo a los principios de la termodinámica, sabemos que los intercambios de calor de un sistema situado a presión constante, con su entorno, vienen dados por su cambio de *entalpía*, la cual a su vez es una *función de estado*, es decir que su variación no depende del tipo de los procesos que sufra el sistema, sino únicamente de las condiciones iniciales y finales del cambio.

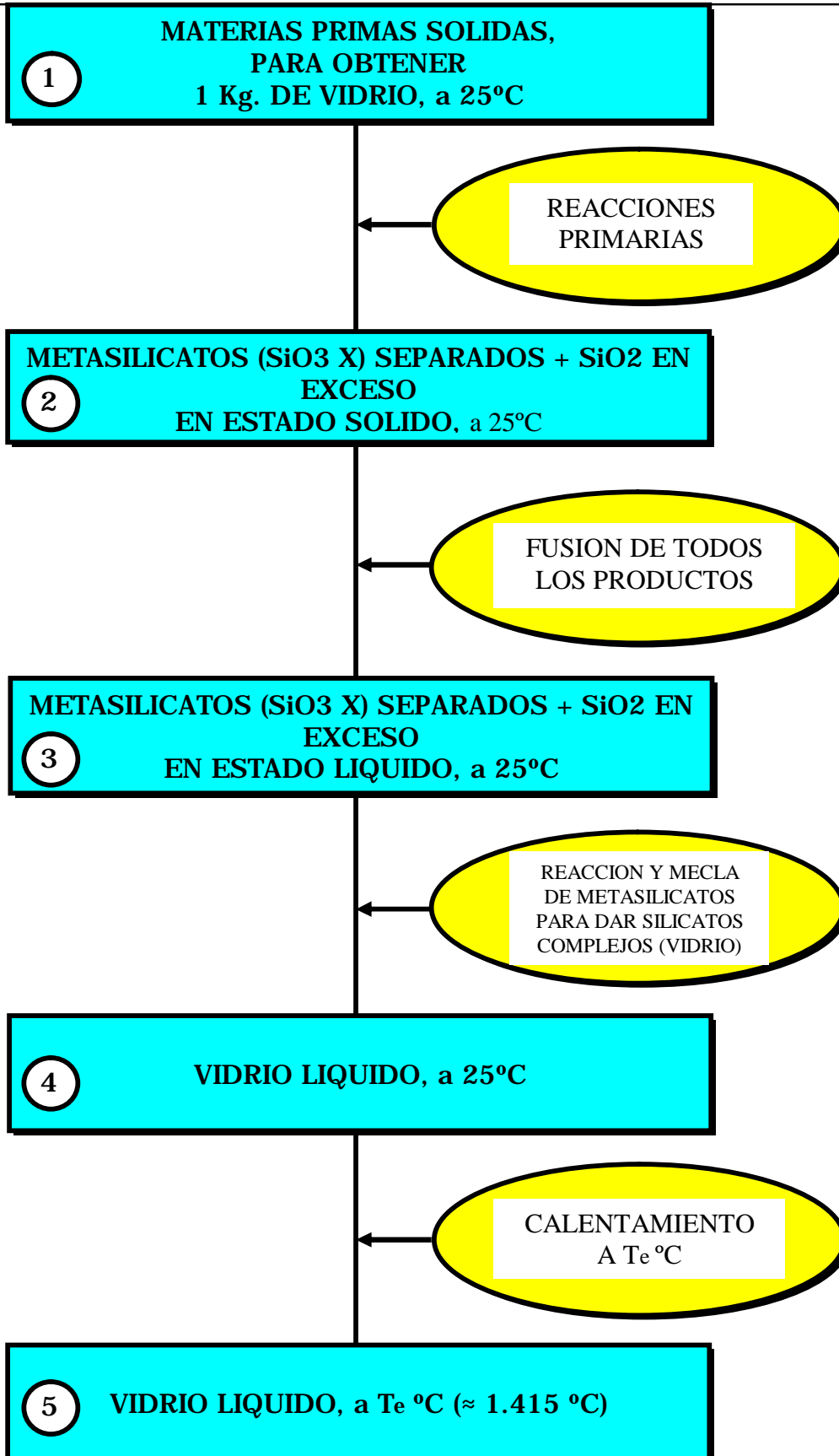
Usando de esta cualidad de la entalpía de un sistema, pasaremos del estado inicial de materias primas (en la cantidad necesaria para obtener **1Kg** de vidrio, a **25 °C**), al de vidrio a **25 °C**, a través de aquellos pasos que, aún no siendo realizables en la práctica, nos faciliten la labor del cálculo de la variación entálpica del sistema.

Los pasos o etapas elegidas son las que se dibujan en la página siguiente.

Etapas 1.- Las materias primas mezcladas y en estado sólido, deben realizar a la temperatura tipo, reacciones como las que se señalan en la página 11 y que las convertirán en metasilicatos de los diferentes elementos metálicos, a **25°C**, quedando un exceso de **SiO₂** sin reaccionar. Este proceso es sencillo de establecer termodinamicamente, si bien es irrealizable en la práctica a velocidades perceptibles. Sin embargo, el cálculo del salto entálpico ΔH_1 es inmediato, como veremos más adelante.

Etapas 2.- Los metasilicatos y la sílice a **25 °C**, en estado sólido y separadamente, se fundirán para pasar al estado líquido a **25 °C**. Al igual que en la etapa anterior, este proceso es sencillo de establecer termodinamicamente, si bien es irrealizable en la práctica a velocidades perceptibles. No obstante, también el cálculo de ΔH_2 es sencillo, si se conoce la diferencia de calores específicos medios entre el material sólido y el líquido.

Etapas 3.- Los metasilicatos y la sílice, ya en estado líquido, deben mezclarse y reaccionar entre sí para dar lugar a la mezcla/disolución de silicatos complejos de difícil definición, y a la que ya llamamos *vidrio*. El valor de ΔH_3 es totalmente desconocido, aunque los trabajos experimentales realizados en su momento por el autor [5], demostraron que para la mayoría de los vidrios industriales, su valor es a lo sumo el **10 %** del valor total.



La suma: $\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 = H_0$ proporciona el valor del calor de formación de un vidrio dado, es decir, *su entalpía tipo de formación (a 25 °C)*.

A los efectos de fijar mejor las ideas, se dan como ejemplos característicos las siguientes reacciones químicas:

Tabla 1.2.1

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	-39,56 Kcal/mol Al_2O_3
$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{SiO}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	128,35 Kcal/mol Fe_2O_3
$\text{SiO}_2 + \text{CO}_3\text{Ca} = \text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} + \text{CO}_2$	20,898 Kcal/mol CaO
$2\text{SiO}_2 + 2\text{SO}_4\text{Ca} + \text{C} = 2\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} + \text{CO}_2 + 2\text{SO}_2$	46,214 Kcal/mol CaO
$2\text{SiO}_2 + \text{CO}_3\text{Ca} \cdot \text{CO}_3\text{Mg} = \text{SiO}_2 \cdot \text{CaO} + \text{SiO}_2 \cdot \text{MgO} + 2\text{CO}_2$	51,996 Kcal/mol MgO
$\text{SiO}_2 + \text{CO}_3\text{Na}_2 = \text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2$	-5,152 Kcal/mol Na_2O
$2\text{SiO}_2 + 2\text{SO}_4\text{Na}_2 + \text{C} = 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{SO}_2$	31,974 Kcal/mol Na_2O
$2\text{SiO}_2 + 4\text{NO}_3\text{Na} + \text{C} = 2\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 4\text{NO}_2$	30,5805 Kcal/mol Na_2O
$\text{SiO}_2 + \text{CO}_3\text{K}_2 = \text{SiO}_2 \cdot \text{K}_2\text{O} + \text{CO}_2$	8,308 Kcal/mol K_2O
$\text{SiO}_2 + \text{CO}_3\text{Ba} = \text{SiO}_2 \cdot \text{BaO} + \text{CO}_2$	30,498 Kcal/mol BaO
$2\text{SiO}_2 + 2\text{SO}_4\text{Ba} + \text{C} = 2\text{SiO}_2 \cdot \text{BaO} + \text{CO}_2 + 2\text{SO}_2$	62,584 Kcal/mol BaO
$\text{SiO}_2 + \text{MnO} = \text{SiO}_2 \cdot \text{MnO}$	-5,91 Kcal/mol MnO
$2\text{SiO}_2 + 2\text{SO}_4\text{Zn} + \text{C} = 2\text{SiO}_2 \cdot \text{ZnO} + \text{CO}_2 + 2\text{SO}_2$	36,184 Kcal/mol ZnO
$\text{SiO}_2 + \text{CO}_3\text{Li}_2 = \text{SiO}_2 \cdot \text{Li}_2\text{O} + \text{CO}_2$	24,998 Kcal/mol Li_2O

Para calcular los calores latentes de fusión de los metasilicatos resultantes, se aplican los valores que procedan de la tabla que, a título de ejemplo, se adjunta. Al calor de formación a 25°C obtenido a partir de sustancias puras, habrá que añadir los calores de evaporación del agua de humectación de las materias primas así como el de deshidratación de sales hidratadas, tales como el $\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, el $\text{SO}_4\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, el $\text{CO}_3\text{Na}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ o el $\text{CO}_3\text{Na}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, todos ellos frecuentemente presentes en las mezclas vitrificables industriales, ya sea como tal materia prima, ya sea como consecuencia de la hidratación que se produce en el momento de la humidificación de las mezclas para evitar polvo en el transporte, facilitar su enhorne, etc.

Como consecuencia de todo lo anterior, podemos decir que, de forma muy simbólica, puede representarse el calor de formación del vidrio según una ecuación del tipo:

$$\sum \text{Materias Primas (sólidas, a 1 atm, 25°C)} @ \text{Vidrio (líquido, a 1 atm, 25°C)} + \sum \text{Gases derivados del vidrio (gas, a 1 atm. y 25°C)} - H_{FV}$$

es decir:

$$(1.2.1) \sum_{i=1}^m \text{MP}_i (s, 1 \text{ atm, } 25^\circ\text{C}) \rightarrow V (l, 1 \text{ atm, } 25^\circ\text{C}) + \sum_{k=1}^p \text{Gv}_k (s, 1 \text{ atm, } 25^\circ\text{C}) - H_0$$

Siendo H_0 el calor de formación, a 25 °C, del vidrio en cuestión, partiendo de sus materias primas.

Tabla 1.2.2

Calores de Formación y de Fusión*			
MATERIA	Peso Molecular g/mol	Entalpía de formación Kcal/mol	Calor fusión Kcal/mol 25°C, 1 atm.
SiO ₂	60,060	-203,350	-3,400
Li ₂ O	28,880	-142,300	
Na ₂ O	61,994	-99,450	
K ₂ O	94,192	-86,200	
MgO	40,320	-143,840	-18,500
CaO	56,080	-151,700	-12,240
BaO	153,360	-133,000	
Al ₂ O ₃	101,940	-399,090	-26,000
CO ₂	44,010	-94,052	
N ₂ O ₄	92,0160	2,2300	
SO ₂	64,060	-70,940	
SiO ₃ Li ₂	89,940	-374,000	-7,490
SiO ₃ Na ₂	122,054	-383,910	-10,300
SiO ₃ K ₂	154,252	-375,000	-13,200
SiO ₃ Mg	100,380	-347,500	-14,700
SiO ₃ Ca	116,140	-377,900	-13,400
SiO ₃ Ba	213,420	-363,000	-13,000
SiO ₂ .Al ₂ O ₃	162,000	-642,100	-10,000
CO ₃ Li ₂	73,890	-289,700	
CO ₃ Na ₂	106,004	-269,460	-7,000
CO ₃ K ₂	138,202	-274,010	-7,800
(CO ₃) ₂ CaMg	184,420	-558,800	
CO ₃ Ca	100,090	-289,500	-12,700
CO ₃ Ba	197,370	-284,200	
NO ₃ Na	85,005	-111,710	-3,760
SO ₄ Na ₂	142,054	-330,500	-5,830
SO ₄ Ba	233,420	-340,200	-9,700
SO ₄ Ca	136,140	-338,730	-6,700

La cantidad de energía necesaria para preparar una unidad de masa (1 Kg, por ejemplo) de vidrio a una temperatura T_e , será la resultante del cálculo anterior, al que se le sumará el calor sensible de su calentamiento desde la temperatura tipo de 25 °C hasta el valor T_e . Esta segunda cantidad de energía se calculará a partir

*Estos datos han sido tomados de las tablas publicadas en el manual de Jhon H. Perry CHEMICAL ENGINEERS HANDBOOK, editado por McGraw-Hill Book Company, Inc., Nueva York, EE. UU.

de: $\int_{25}^{T_e} C_p(T).dT$, sabiendo que la función $C_p(T)$ se obtiene de las relaciones empíricas que se detallan en §1.1.

1.3.- EJEMPLO DE REFERENCIA

Para poder ocuparnos, tanto en este capítulo como en los demás, de un caso concreto que fije mejor las ideas, vamos a tomar un conjunto de valores a los que nos iremos refiriendo a lo largo de este estudio. Como composición de vidrio, tomaremos el que se detalla en la tabla siguiente. A partir de esta tabla, se determinan sus propiedades según las Tablas II, III, 1.2.1 y 1.2.2, y que se resumen en las otras tablas, adjuntas.

Tabla 1.3.1

Materia	Kg M.P.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
Arena-1	58,738	95,460	2,260	0,120	1,850	0,010	0,040	0,150	
Arena-2	17,388	98,300	0,970	0,030	0,190	0,010	0,100	0,040	
Sosa Solvay	22,186	0,040	0,030	58,440				0,001	
Caliza	18,993	0,150	0,030	0,030	0,010	0,110	55,700	0,025	
Dolomía		0,150	0,030	0,030	0,010	19,500	27,000		
Sulf. Sódico	0,400			43,300					
Nit. Sódico				35,620				0,001	
Total M.P.	117,705								
VIDRIO	100,00	73,20	1,51	13,22	1,12	0,03	10,62	0,1000	0,20

PROPIEDADES DEL VIDRIO "MODELO"		Grupo 1º	
Propiedad	Valores	Unidades	Fuente
Densidad a 0°C = $\rho_0 - \beta(T) \cdot T$	2,4892	g/cm ³	Gilard & Dubrul
$\beta(T)$ entre 1.000°C a 1.500°C	0,0001657	°C ⁻¹	
Coeficiente de dilatación lineal	8,7191·10 ⁻⁶	°C ⁻¹	Wilkelman & Schott
Tensión superficial a 1.200°C	319	dinas/cm	Rubenstein
Índice de refracción a 589,3 nm	1,5165		Gilard & Dubrul
Módulo de elasticidad	719	Kbar	Appen
Módulo de Poisson	0,2210		Wilkelman & Schott
Resistencia a la tracción	909	bar	Wilkelman & Schott
Resistencia a la compresión	9.439	bar	Wilkelman & Schott
Constante dieléctrica (4,5·10 ⁸ Hz)	7,30		Appen & Bresker
Resistividad eléctrica a 1.500°C	0,5091	log ρ (Ω .cm)	R.M.P.
Resistividad eléctrica a 1.100°C	1,0630	log ρ (Ω .cm)	R.M.P
α	3371,5394		
β	-1,3923		
Entalpía a 1 atm		Kcal/Kg	Sharp & Ginter
a	5,0973·10 ⁻⁴		
b	0,1741		
c	0,00146		
Calor específico, a 1 atm		Kcal/Kg,°C	Sharp & Ginter
A	7,4421·10 ⁻⁷		
B	1,0195·10 ⁻³		
C	0,1741		
D	0,00146		
Desvitrificación			R. Cuartas
T.S.D.	1.046,0	°C	
T.V.M.	930,5	°C	
V.M.	6,24	μ m/min	
Atacabilidad			R. Cuartas
Alcalinidad D.G.G.	7,00	mg Na ₂ O/100 ml	
Extracto seco 1.100°C D.G.G.	21,44	mg/100 ml	
Atacabilidad superficial	0,85	ml ClH0,01N/g	
Atacabilidad DIN 12111	13,52	ml ClH 0,01N/100ml	
Conductividad térmica a 0°C, λ_0	0,00208	cal/cm.seg.°C	
$\lambda = \lambda_0 + k \cdot T$	3,56·10 ⁻⁶	cal/cm.seg	

Grupo 2º

$$\log \mu = \frac{\alpha}{T - \beta} - \gamma$$

VISCOSIDADES (poises)				
<u>Log</u> <u>μ</u>	<u>T °C</u>	<u>α</u>	<u>β</u>	<u>γ</u>
2,00	1.457,9			
2,50	1.312,2	4.428,3	246,77	1,6565
3,00	1.198,2			
3,50	1.105,6			
4,00	1.029,2			
4,50	965,1	4.185,2	262,82	1,4612
5,00	910,6			
5,50	864,0			
6,00	823,5			
7,60	727,7	5.189,3	216,01	2,5424
13,00	549,9			
14,50	511,1			

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA APARENTE

Temperatura <u>°C</u>	Conductividad		
	<u>Oxidado</u>	<u>Reducido</u>	
1.100	0,4186	0,1563	k = k·T ⁿ cal/cm.seg.°K
1.200	0,5721	0,2134	
1.400	0,9757	0,3636	
n	4,2821	4,2719	
K	1,5344·10 ⁻¹⁴	6,1663·10 ⁻¹⁵	

CALOR DE FORMACIÓN = 194,7 Kcal/Kg