

Tema 7. Materiales compuestos

7.1. Introducción a los materiales compuestos. 7.2. Materiales compuestos reforzados con partículas. 7.3. Materiales compuestos reforzados con fibras. 7.4. Cementos y hormigones.

7.1. Introducción a los materiales compuestos. Un material compuesto es un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más micro o macroconstituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre si. Es importante destacar la escala de longitudes donde se trata la microestructura (entre 10^{-7} y 10^{-4} m \equiv 0.1 μ m y 100 μ m), macroestructura ($> 10^{-3}$ m \equiv >1 mm) y la nanoestructura (o estructura atómica) [$< 10^{-8}$ m \equiv < 10 nm \equiv < 100 Å]. La importancia ingenieril de los materiales compuestos es muy grande ya que se combinan las propiedades y prestaciones de los materiales constituyentes cuando se diseña y se fabrica el material compuesto correctamente. La mayor parte de los **materiales compuestos** están formados por dos o más fases, una **matriz** continua que rodea a las demás fases que se denominan **fases dispersas** y que se clasifican en función de su microestructura o geometría. La microestructura de la fase dispersa incluye la forma, tamaño, distribución y orientación de las partículas. Cuando se dan las proporciones de material matriz y material disperso hay que distinguir claramente entre relaciones en peso o en volumen ya que las densidades de estas fases pueden ser muy diferentes. Por esto, concentraciones de material fibroso dispersado en una matriz del 50 % en volumen puede equivaler a una concentración muy diferente en % en peso.

Un ejemplo de material compuesto conocido por todos y presente universalmente en la naturaleza es la madera. Aunque hay maderas muy diferentes y con propiedades mecánicas y de conducción de fluidos muy variadas tienen en común una matriz celulósica reforzada con fibras de lignina (y otros compuestos orgánicos) que le dan las buenas propiedades de elasticidad y deformación sin ruptura, típica de la madera. En un sentido amplio, los aceros con microestructura perlítica (p. ej. matriz de ferrita proeutectoide con perlita) o las fundiciones grises (escamas de grafito en una matriz de ferrita y perlita) se pueden considerar como materiales compuestos.

Basados en el criterio de la naturaleza de la microestructura de la fase dispersa para la clasificación de los materiales compuestos se pueden establecer tres grandes grupos: 1) compuestos reforzados con partículas, 2) compuestos reforzados con fibras, 3) compuestos estructurales. A su vez, estos grupos presentan subdivisiones. Los materiales compuestos estructurales presentan una combinación de materiales homogéneos y las propiedades dependen más de la geometría del diseño de los elementos estructurales que de la naturaleza de los materiales constituyentes. Estas capas de materiales suelen ser laminares o sandwiches y son muy anisotrópicos. Por ejemplo, la madera contrachapada es un ejemplo común. Un ejemplo de estructura laminar relativamente compleja son los esquís modernos. Existen otra clasificación de materiales compuestos en función de la naturaleza de la matriz: 1) Compuestos de matriz metálica (MMC); 2) Compuestos de matriz cerámica (CMC); 3) Compuestos de matriz polimérica (PMC). Estos últimos son los de mayor

importancia tecnológica principalmente cuando están reforzados con fibras. Así hay diferentes acrónimos como: CFRP “Carbon Fiber Reinforced Plastic”, BFRP “Boron Fiber Reinforced Plastic”, GFRP “Glass Fiber Reinforced Plastic”, AFRP “Aramid Fiber Reinforced Plastic”. Para dar una idea del uso cada vez mayor de los materiales compuestos ligeros basta decir que el avión de combate F-14 construido en 1970 tenía ~ 4 % en peso de materiales compuestos mientras que el jet comercial Avtek 400, de 1985, tenía ~ 80 % en peso de materiales compuestos.

7.2. Materiales compuestos reforzados con partículas. A su vez estos materiales se clasifican en **materiales reforzados con partículas grandes** y otros **consolidados por dispersión**. El término “grande” se utiliza para indicar las interacciones entre la matriz y las partículas a un nivel ~ macroscópico. El material compuesto reforzado con partículas grandes más común es el hormigón. Las partículas son la arena o grava en una matriz cerámica compuesto por silicatos y aluminatos hidratados. El proceso de fabricación de cemento, su mezcla e hidratación para dar hormigón y las propiedades mecánicas que se derivan se estudiarán en el apartado 7.4 debido a su gran importancia industrial y tecnológica.

Algunos materiales poliméricos a los que se les ha añadido un aditivo de relleno (estudiados en el tema de polímeros) se comportan como materiales compuestos reforzados con partículas grandes. Las partículas pueden tener una gran variedad de geometría pero suelen tener aproximadamente las mismas dimensiones en todas las direcciones (equiaxiales) lo cual es la gran diferencia con las fibras. El reforzamiento es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz. Las propiedades mecánicas mejoran con el contenido en partículas o lo que es lo mismo con el incremento de la relación partículas/matriz.

Todos los materiales (metales, polímeros y cerámicas) se utilizan para fabricar este tipo de materiales. Los compuestos metal-cerámica, **cermets**. El cermet más común es un carburo cementado, por ejemplo WC o TiC embebidos en una matriz metálica de cobalto o níquel. Tienen gran aplicación en materiales para herramientas de corte en acero endurecidos con carburos precipitados (cementados). Estas partículas extremadamente duras aportan el efecto de cortante a la superficie pero son frágiles por lo que estos carburos por si mismo no pueden soportar los grandes esfuerzos mecánicos en el corte. También se emplean cermets como ánodos en pilas de combustible. En el caso de los polímeros son comunes los materiales reforzados con negro de humo que son micropartículas (con diámetros entre 20 y 50 nm) esencialmente esféricas de carbono producidas por la combustión incompleta del gas natural u otros derivados del petróleo. La adición de este material (muy barato) al caucho vulcanizado aumenta la tenacidad y las resistencias a la tracción, torsión y desgaste. Los neumáticos de los vehículos contienen entre un 15 al 30 % en volumen de negro de humo. Otro ejemplo de refuerzo por dispersión de partículas pequeñas pueden ser la adición de ~ 3 % de toria (ThO₂, cerámica) a las aleaciones de Ni lo que aumenta mucho la resistencia a altas temperaturas.

7.3. Materiales compuestos reforzados con fibras. Estos son los materiales compuestos más conocidos por sus altas prestaciones mecánicas y el alto valor añadido del material final. La fase dispersa consta de fibras que es una microestructura muy anisotrópica, hilos o cilindros de $\sim 2\text{-}10\ \mu\text{m}$ de diámetro y $\sim 1\ \text{mm}$ de longitud. Por tanto, tienen una longitud \sim tres órdenes de magnitud mayor que el diámetro. Mientras que el módulo de elasticidad no cambia con el tamaño del material, solo depende de la naturaleza de las fuerzas que unen los átomos, la resistencia mecánica si cambia con la forma de la muestra. Probetas de menor tamaño (más estrechas) presentan resistencias comparativamente más altas. La explicación se debe a que disminuye la probabilidad de encontrar defectos en la escala macro-microscópica que son principales responsables que aparezca la grieta y la fractura. Esto fue demostrado en 1920 por Griffith al ensayar con barras de vidrio de diámetro progresivamente inferior. Por esto las fibras presentan mejores prestaciones mecánicas porque la probabilidad de encontrar defectos disminuye y además se anclan en la matriz que rodea uniformemente a las 'fibrillas'. Por esto, desde el punto de vista de las propiedades mecánicas son aconsejables las fibras de diámetro lo menor posible. Sin embargo, por razones de coste y de seguridad se limita a $\sim 1\ \mu\text{m}$ de diámetro porque fibras menores (con longitudes también menores) son más caras y se pueden liberar en el mecanizado de las piezas originando partículas fibrosas en suspensión (como los asbestos) que pueden causar problemas de salud. De forma general las matrices son resinas epoxi o poliéster. Las propiedades mecánicas son generalmente anisotrópicas y varían mucho según el grado de ordenamiento de las fibras en el interior del material: ordenadas uniaxialmente, parcialmente ordenadas y desordenadas.

El alto valor añadido de estos materiales se puede comprobar en la Tabla 7.1 dónde se dan los valores por kilogramos de diferentes materiales. También se dan en la tabla las variaciones del módulo de Young y de la resistencia a la tracción para los diferentes tipos de materiales.

Tabla 7.1. Propiedades y precios aproximados de materiales y materiales reforzados con fibra

material	Precio \sim (€/kg)	ρ (g/cc)	E (GPa)	S (GPa)
Hormigón term. (Cemento, Ladrillo)	0.04 0.07	2.8	45	0.005
Acero (Acero 18/8)	0.5 (5.0)	7.8	210	2.8
PVC-no plastif.	0.7	1.3	0.4	0.035
Aluminio	1.3	2.7	70.5	0.045
Vidrio E¹	1.8	2.54	72	1.5
Latón 70/30	2.2	8.5	100	0.55
Vidrio S²	18	2.48	82	3.0
Carbono HS³	30	1.7	200	4-6
Kevlar49⁴	30	1.5	140	3.0
UHPE⁵	120	0.97	120	2.6
LDPE	0.7	0.92	0.2	0.001-0.016
Cabono-UHM⁶	300	1.85	600	2

¹ Fibra de vidrio eléctrico normal. ² Fibra de vidrio de alta resistencia. ³ Fibra de carbono de alta resistencia.

⁴ Fibra de poliamida. ⁵ Polietileno de ultra-alto peso molecular. ⁶ Fibra de carbono de ultra-alto módulo.

Las matrices poliméricas para los materiales compuestos reforzados con fibras suelen ser plásticos termoestables del tipo resinas de poliéster insaturadas o resinas epoxi que fueron estudiadas en el tema dedicado a polímeros. Las primeras fueron las que se comenzaron a utilizar hace unos 40 años, son más baratas, fáciles de maquinar, fáciles de curar a temperatura ambiente (aunque se pueden curar de forma acelerada a alta temperatura). Las resinas epoxi son ahora más comunes por las ventajas que presentan: mayor resistencia, menores modificaciones en la etapa de curado, mejor adherencia a las fibras, y se pueden utilizar a temperaturas más altas que las resinas de poliéster. Las resinas epoxi son la base de los materiales compuestos basados en fibra de carbono o de poliaramida.

Fibra de vidrio. La matriz más común son las resinas de poliéster. Hay dos variedades típicas la normal (Vidrio E, composición: SiO₂ 55 %, CaO 16 %, Al₂O₃ 15 %, B₂O₃ 10 %) y la de alta resistencia (Vidrio S, composición: SiO₂ 65 %, Al₂O₃ 25 %, MgO 10 %). Esta última tiene una excelente relación resistencia/precio por lo que es muy utilizada pero su bajo módulo elástico es su principal limitación, y son muy utilizadas en el reforzamiento de plásticos en general por su bajo precio. Estas composiciones son fácilmente hilables en fibras de alta resistencia. Tienen una densidad y propiedades a la tracción comparable a las fibras de carbono y aramida pero menor resistencia y modulo de tensión aunque pueden sufrir mayor elongación sin romperse. Las aplicaciones más comunes son: carrocerías de automóviles y barcos, recipientes de almacenaje, principalmente la industria del transporte en general. Recientemente ha aparecido un material de matriz de nailon reforzado con fibra de vidrio que es extraordinariamente fuerte y con gran resistencia al impacto.

Fibra de carbono. Matriz epoxi. Tiene tres variantes, alta resistencia, intermedio y alto módulo (Tabla 12.1). Son muy útiles para aplicaciones donde los factores críticos son la rigidez, resistencia y bajo peso pero donde el precio es un factor secundario. Es muy utilizada en la industria aeronáutica para disminuir el peso de los aviones. Su elevado precio limita las aplicaciones en la industria del automóvil. Los precursores son el PAN o la brea. En general las fibras de carbono se obtienen a partir de las fibras de PAN en tres etapas: 1) estabilización [donde se estiran las fibras PAN y se oxidan a 200-220 °C mientras se mantiene la tensión]; 2) carbonización [calentamiento a 1000-1500 °C en atmósfera inerte para eliminar H, O, N, proceso en el que se forman algunas fibras de grafito pero no demasiadas]; 3) grafitizado [calentamiento a T > 1800 °C para aumentar el modulo de elasticidad a expensas de disminuir un poco la resistencia a la tracción, en esta etapa se transforma casi todas las fibras a estructura grafito y aumentan su orientación].

Fibra de polímeros. La fibra de poliaramida es una de las más comunes y el Kevlar49® es el nombre comercial más utilizado. Fueron introducidas por la Du Pont en 1972, también existe en Kevlar29®. El primero tiene baja densidad, alta solidez y alto módulo. La unidad química repetitiva de la cadena poliaramida es [-CO-φ₁₋₄-CO-NH-φ₁₋₄-NH-]_n (para). Tienen matriz epoxi. Son muy comunes en la industria aeronáutica y aeroespacial pero están ganando mercado en otras aplicaciones como equipos deportivo de alta resistencia y bajo peso (p. ej. tablas de ski), cascos de

barcos, y otras aplicaciones más puntuales como asientos a la medida, etc. Son muy tenaces y permiten la absorción de energía en impactos sin romperse. El KEVLAR49® es más resistente en algunas propiedades que el acero con $E \sim 200$ GPa y 210 para el acero, pero la resistencia a la tensión es mayor que la del acero, 3.6 GPa frente a 2.8 GPa. Descompone antes de fundir lo que hace que no se pueda procesar por las técnicas normales. El nomex® es otra fibra de poliaramida pero con la sustitución en meta. Es mucho menos resistente pero puede sufrir mas deformaciones plásticas sin romperse. Esto lo hace mucho mas flexible, $E \sim 20$ Gpa, por lo que se puede deformar mucho más. Este polímero se utiliza, por ejemplo, para trajes de bomberos y trajes espaciales.

Además de las fibras comunes, hay materiales compuestos reforzados con **whiskers**. Esta microestructura son pequeños filamentos (prácticamente monocristales) producidos de tal forma que están casi libre de defectos. Whiskers monocristalinos de cerámicas tienen un tamaño de unos pocos milímetros de longitud y varias micras de diámetro. Tienen superficies muy planas y al estar libres de defectos las propiedades mecánicas son cercanas a las teóricas. Sin embargo, los costes de producción son altos y la unión con las matrices presentan dificultades técnicas. Hay whiskers de Al_2O_3 , SiC, BeO, C grafito, etc.

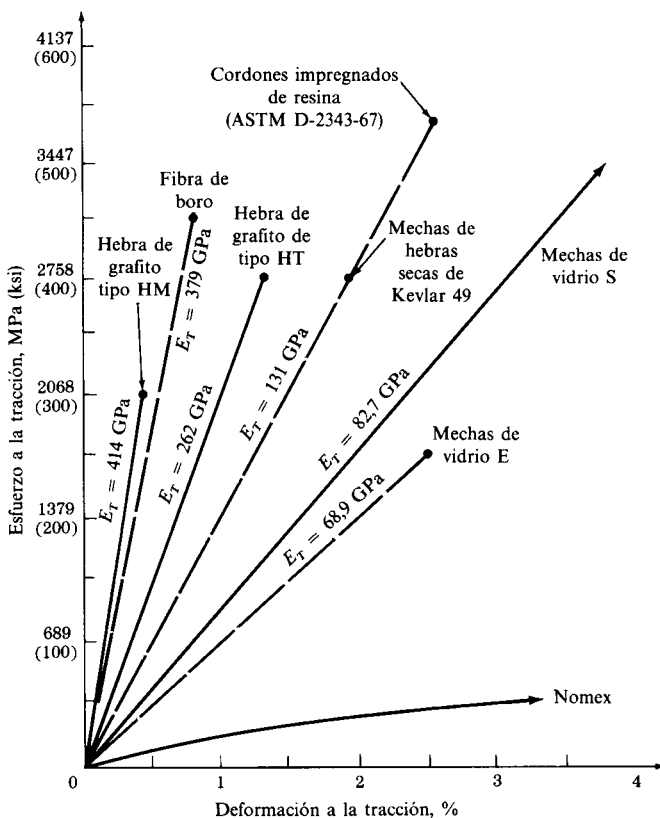


Figura 7.1. Comportamiento de σ - ϵ de varios materiales reforzados con fibras

En la figura 7.1 se comparan los diagramas típicos de ϵ - σ de varios materiales reforzados con fibras, incluyendo los que se han estudiado en detalle anteriormente. Las fibras de carbono presentan la mejor combinación de alta resistencia, alta rigidez (módulo) y baja densidad pero tienen poca elongación lo que significa que no se pueden deformar mucho. Las fibras de kevlar49® tienen alto módulo (pero no tanto como las de carbono) y mayores elongaciones lo que significa mayor resistencia al impacto (pueden absorber mayor energía antes de romperse). Estas propiedades se comparan muy bien con la de metales típicos como el acero o el aluminio. En la figura 7.2 se dan los valores de los módulos de Young (normalizados respecto de la densidad) para muchos materiales.

En la figura 7.3 se dan los valores de la resistencia a la tracción (normalizados respecto de la densidad) para los mismos materiales. Se puede destacar como los materiales compuestos reúnen las propiedades más sobresalientes por lo que están teniendo un uso cada vez mayor.

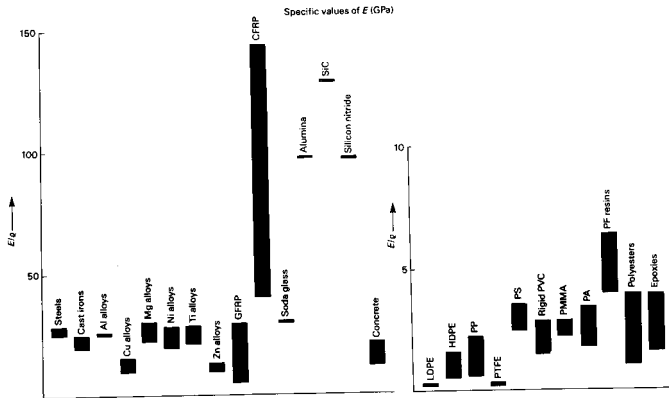


Figura 7.2. Valores específicos del módulo de Young E ($GPa/g.cm^{-3}$)

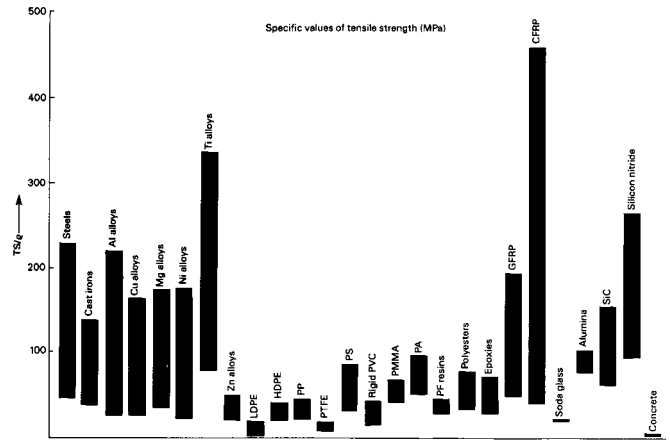


Figura 7.3. Valores específicos de la resistencia a la tensión S ($MPa/g.cm^{-3}$)

Actualmente, cada vez se utilizan más materiales reforzados con fibras que sean más baratos y de menor impacto medioambiental. Para ello se están reforzando muchos polímeros con fibras provenientes de productos naturales como el lino o la fibra de coco. Cada vez se utilizan más en la industria del automóvil donde según una directriz de la UE para el 2015 el 95 % de la masa de un coche debe ser reutilizable. Además, si las fibras de refuerzo vienen de vegetales, el impacto medioambiental total en la fabricación de las piezas es mucho menor.

Tabla 7.2. Propiedades de algunas fibras naturales que se utilizan en materiales compuestos.

Fiber	Density (g/cm^3)	Moisture content (wt. %)	Elongation at break (%)	Fracture stress (MPa)	Young's modulus (GPa)
Cotton	1.5	-	7.0-8.0	287-597	5.5-12
Jute	1.3	12.6	1.5-1.8	393-773	26.5
Flax	1.5	10.0	2.7-3.2	345-1035	27.6
Hemp	-	10.8	1.6	690.0	-
Sisal	1.5	11.0	2.0-2.5	511-635	9.4-22
Coir (fruit)	1.2	8.0	30.0	175.0	4.0-6.0
Bamboo	0.8	-	-	391-1000	48-89
Soft wood	1.5	-	-	1000.0	40.0
Pineapple	-	11.8	1.6	413-1627	34.5-8
Ramie	1.5	8.0	3.6-3.8	400-938	61.4-1

En la tabla 7.2 se dan los valores de la densidad, contenido de humedad, elongación antes de la ruptura, resistencia a la ruptura y módulo de Young de diferentes fibras naturales. En la tabla 7.3 se dan ejemplos de resinas poliméricas biodegradables tanto naturales como artificiales. Se está dedicando mucho esfuerzo de investigación en la fabricación de materiales compuestos completamente “ecológicos” o “verdes”. En ellos se refuerza la matriz del polímero natural (p. Ej. celulosa) con fibras de origen vegetal (p. Ej. fibra de lino). Ya existen polímeros comerciales completamente “verdes” y se prevé que su producción aumente en el futuro (aunque actualmente los precios son mayores que los análogos obtenidos del petróleo).

Tabla 7.3. Polímeros biodegradables naturales y artificiales.

Natural	Synthetic
1. Polysaccharides	1. Poly(amides)
• Starch	2. Poly(anhydrides)
• Cellulose	3. Poly(amide-enamines)
• Chitin	4. Poly(vinyl alcohol)
• Pullulan	5. Poly(ethylene-co-vinyl alcohol)
• Levan	6. Poly(vinyl acetate)
• Konjac	7. Polyesters
• Elsinan	• Poly(glycolic acid)
2. Proteins	• Poly(lactic acid)
• Collagen/Gelatin	• Poly(caprolactone)
• Casein, albumin, fibrogen, silks, elastins	• Poly(ortho esters)
• Protein from grains	8. Poly(ethylene oxide)
3. Polyesters	9. Some poly(urethanes)
• Polyhydroxyalkanoates	10. Poly(phosphazines)
4. Other Polymers	11. Poly(imino carbomates)
• Lignin	12. Some poly(acrylates)
• Lipids	
• Shellac	
• Natural Rubber	

7.4. Cementos y hormigones. Hay varios tipos de materiales compuestos para la construcción y desde el tiempo de los egipcios se conocía el **adobe** que consiste en una mezcla de fibra de paja en una matriz de arcilla (con agua) para dar una pasta moldeable de la que se hacían ladrillos (con la forma deseada) y que se ha utilizado como cemento en construcciones. Actualmente, el **hormigón** es un material más importante y más usado como componente estructural en la construcción. En 1982 se produjeron $50 \cdot 10^7$ T de hormigón en EEUU, cantidad bastante mayor de las $6 \cdot 10^7$ T de acero en el mismo año (en volumen la diferencia es mucho mayor por las distintas densidades). Tiene la ventaja de la flexibilidad de diseño puesto que en su estado pastoso inicial se puede verter y adquiere la forma que lo contiene, es muy barato (Tabla 12.1), alta dureza, resistencia al fuego, y puede ser fabricado en el lugar. Los inconvenientes son escasa resistencia a la tensión, baja ductilidad y sufre problemas de dilatación/contracción con las variaciones de temperatura.

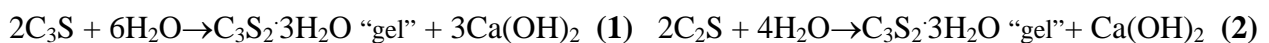
El hormigón es un material compuesto formado por partículas dispersas (grava y arena) de gran tamaño (0.5 – 20 mm) generalmente SiO_2 en una matriz dura de silicatos y aluminatos (aglutinantes) que provienen de la hidratación del **cemento** (generalmente Portland, aunque hay otros como los de alto contenido en aluminio). La pasta moldeable original se forma por la agitación física de las cantidades adecuadas de cemento Portland (~ 7-15 %), agua (~ 14-21 %), agregado fino (arena 24-30 %) y agregado tosco (grava 31-51 %). La pasta del cemento actúa en el hormigón como aglutinante y mantiene unidas las partículas.

El cemento Portland (que debe su nombre a una pequeña península en la costa sur de Inglaterra) puede tener composiciones variable pero dentro de unos rangos definidos. Las materias primas básicas son: 1) caliza CaO , realmente se recoge la calcita del yacimiento y se descarbonata en el horno de clinquerizado; 2) arena (sílice, SiO_2); 3) alúmina (Al_2O_3) proveniente de yacimientos de alúmino-silicatos (arcillas); 4) óxido de hierro (Fe_2O_3) generalmente provienen de la tostación de pirritas. Una vez molturados, se introducen en el horno giratorio inclinado, horno de clinquerizado,

junto con carbón y es la combustión de este carbón el que propicia la elevada temperatura (cerca de 1500 °C) donde existen pequeñas fases líquidas que originan el producto de salida, clínker, que contiene las siguientes fases cristalinas: **1)** silicato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S) ~ 60 %; **2)** silicato dicálcico, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_2S) ~ 20 %; **3)** aluminato tricálcico, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) ~ 10 %; **3)** aluminoferrato tetracálcico, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (C_4AF) ~ 10 %. Este clínker puede tener composiciones ligeramente diferentes en función del uso a que se destine ya que se producen varios tipos de cementos Portland. Una vez molturado, el clínker se mezcla con una pequeñas cantidades de agua y yeso ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) para controlar el tiempo de preparación del hormigón, con valor total aproximado menor del 10 %. En función del tipo de cemento se le pueden añadir otros aditivos en la molienda final como cenizas volantes, etc.

Se pueden modificar las condiciones de endurecimiento como tiempo y temperatura ajustando las fases que componen el clínker y por tanto el cemento. Si se necesita un cemento con bajo calor de hidratación se baja la cantidad de C_3S a ~ 25 % y se eleva la del C_2S a ~ 50 %. Si se desea un endurecimiento rápido se eleva la de C_3S a ~ 65-70 % y se disminuye la de C_2S a ~ 10 %. Para resistir a los sulfatos se eleva la relación de C_2S y C_4AF .

Las reacciones de hidratación de los cementos son bastante complicadas. La reacción inicial de los silicatos cálcicos da un silicato cálcico hidratado según las reacciones químicas (1) y (2) generando partículas extremadamente pequeñas ($< 1\mu\text{m}$) comportándose como un gel coloidal amorfo (gel C-S-H) y libera hidróxido cálcico “cristalino”. El C_3S reacciona rápidamente y es el responsable del endurecimiento rápido del cemento Portland. El C_2S reacciona más lentamente y es el responsable del endurecimiento del cemento Portland en periodos de grandes (los ensayos mecánicos típicos de dureza y resistencia a la tracción se hacen a los 28 días de la preparación de la mezcla). El C_3A se hidrata rápidamente con la liberación de mucho calor. El C_4AF se produce en el cemento porque el óxido de hierro reduce las temperaturas a la que se producen líquidos en el horno de clínkerizado por lo que se puede operar a temperaturas relativamente más bajas con el ahorro energético y económico que ello conlleva.



El hormigón es un material compuesto formado por cerámicos y tiene una resistencia a la compresión mucho mayor que a la tensión (un orden de magnitud). La mejora de las propiedades de resistencia a la tracción se puede llevar a cabo mediante el refuerzo con barras de acero (que pueden estar pretensadas). Si las barras están tensadas en el momento del fraguado, el hormigón aumenta más la resistencia. El hormigón reforzado con acero se conoce como hormigón armado y constituye la etapa de encofrado de un edificio para construir la estructura básica de pilares.

El **alquitrán** (o bitumen) es un polímero termoplástico que se obtiene a partir de la destilación fraccionada del petróleo (última fracción). Sirve por su efecto adhesivo para pavimentación de carreteras. El **asfalto** es un material compuesto con agregado y aglutinante. El agregado suele ser arena (y grava fina). El aglutinante suele ser alquitrán. Se están utilizando productos del reciclado vidrio como agregado.