

1. Introducción

1.1. LA INDUSTRIA CEMENTERA ANTE LA REUTILIZACIÓN DE RESIDUOS

La utilización de residuos como adiciones en cementos, así como su estabilización para minimizar potenciales efectos adversos sobre el medioambiente, está recibiendo en los últimos años una notable atención (Van der Sloot y cols., 1989).

Las técnicas de reutilización de residuos han sido históricamente practicadas, si bien es cierto que a pequeña escala y circunscrita, casi en exclusiva, a la construcción. No en vano la construcción es una excelente industria para la absorción de cuantiosas cantidades de residuos, ya sea tal y como se presentan (como por ejemplo cenizas volantes) o bien una vez sometidos a ciertos procesos de adecuación previa (como materiales de demolición). La **industria cementera** ha sido pionera en la **reutilización** y **reciclado** de subproductos industriales para la fabricación de cementos hidráulicos, con el consiguiente ahorro energético. De este modo, de los 27 tipos de cementos comunes, recogidos en la norma UNE-EN 197-1 y la *Instrucción para la Recepción de Cementos* (RC-08), solamente uno de ellos no lleva explícitamente adiciones (CEM I), aunque puede incorporarlas hasta un máximo de un 5% como componentes minoritarios.

Una de las ventajas que presenta el sector de la construcción es que, al margen de poder digerir ingentes cantidades de residuos, admite una gama inmensa de calidades, lo que permite confeccionar una gran panorámica de materiales, cada uno idóneo para un uso concreto.

Por ello, adecuar este tipo de residuos a las necesidades medioambientales a través de su estabilización por confinado físico y/o químico es de suma importancia ya que, dadas las propiedades y composición de algunos residuos, no pueden ser abandonados o depositados por sí solos.

Por lo tanto, en este trabajo se plantea la utilización del coque de petróleo, debido a que la generación del mismo va en aumento, no solo por los avances en la química del hidrógeno, sino también por el uso cada vez mayor de combustibles y la menor calidad de los mismos.

1.2. EL COQUE DE PETRÓLEO

Se denomina coque al producto de elevado contenido en carbono, resultante de la pirólisis de material orgánico que, al menos en parte, ha pasado a través de un esta-

do líquido o líquido-cristalino, durante el proceso de carbonización y que está constituido por carbón no grafito (Rodríguez-Reinoso, 1989).

Asimismo, el **coque de petróleo** es un residuo sólido, clasificado como 050501: «Residuos con contenido de azufre procedentes de refinado de petróleo, purificación del gas y tratamiento pirolítico del carbón», según el *Catálogo Europeo de Residuos* (CER-2001), de alto contenido en carbono que se produce como **subproducto** de la carbonización de fracciones de hidrocarburos de elevada ebullición obtenidos en el procesamiento del petróleo (residuos pesados). Teniendo por objetivo la extracción de las fracciones más valiosas del crudo, que son las de menor peso molecular, las refinerías hacen pasar los residuos de *destilación atmosférica* o de *craqueo*, con mayor peso, por unidades de *coquización*.

1.2.1. Proceso de obtención

El refinado de petróleo es un proceso de separación físico-químico que divide los diferentes constituyentes del crudo según su punto de ebullición por efecto del calor. El petróleo crudo se calienta en un horno hasta una temperatura próxima a 400 °C para hacerlo pasar a estado vapor, posteriormente es conducido hasta el inferior de una torre de destilación, en la cual, por medio de bandejas y platos, que condensan los vapores más pesados y evaporan los más livianos, se logra fraccionar el crudo (figura 1).

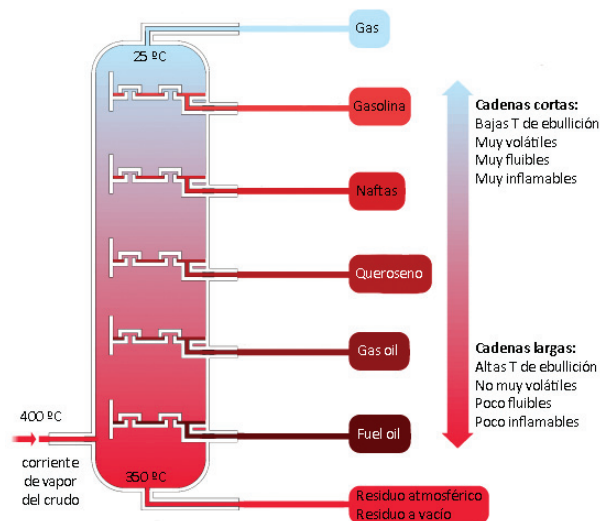


Figura 1. Proceso de destilación primaria del crudo de petróleo.

En la parte superior de la torre se obtienen, a temperatura ambiente, hidrocarburos ligeros, como etano, propano o butano; en la parte intermedia de la columna se recogen fracciones con punto de ebullición intermedio tales como naftas, queroseno, gas oil o fuel oil. En la parte inferior, a temperaturas próximas a 350 °C, queda la fracción más pesada, denominada *residuo atmosférico*, la cual, si se somete a una destilación a presión reducida se obtiene el *residuo a vacío*.

Una vez terminado el proceso de destilación primaria, las fracciones (o corrientes) intermedias y pesadas del crudo son sometidas a procesos de coquización. La coquización (como sinónimo de carbonización) es ampliamente utilizada en la industria

petrolera para convertir los residuos pesados, procedentes del proceso de refino, en gas oil, gasolina y coque (Onder y Bagdoyan, 1993).

El proceso de coquización no está encaminado a producir coque, sino a maximizar la producción de destilados o volátiles por medio de distintas condiciones de operación, exprimiendo, hasta el límite, cualquier corriente de refinería. Por lo tanto, la coquización es un proceso por el cual se intenta extraer, por medio de un craqueo térmico, la mayor parte de hidrógeno remanente en una corriente secundaria de refino, resultando un residuo con alto contenido en carbono, denominado coque (J. M. Jiménez, 2007).

Pero el coque de petróleo no está referido a un único producto, sino que lo forman varios tipos de productos cuyas características y propiedades son diferentes. Existen cuatro clases principales:

- i. Coque **combustible**
- ii. Coque **regular** (o de esponja)
- iii. Coque de **aguja** (o premium)
- iv. Coque de **recarburación**

Las características de cada categoría de coque resultante vienen definidas, principalmente, por los procesos de coquización y la composición de las corrientes de alimentación secundarias (Speight, 2004). Estos cuatro tipos de coque, obtenidos después de su coquización retardada, han sufrido tratamientos térmicos entre 400 y 600 °C, lo que ha generado en ellos una condensación de macromoléculas poliaromáticas planas producidas por polimerización, vía radicales libres, previa deshidrogenación y cracking térmico no catalítico (J. M. Jiménez, 2007). A los citados coques, obtenidos directamente del proceso de coquizado retardado, se les denomina **coques verdes**, debido al mayor contenido de componentes volátiles.

En otra unidad operacional, el coque verde es sometido a un proceso llamado de calcinación, formando el llamado **coque calcinado**, cuyo contenido en volátiles es bastante reducido. En el proceso de calcinación del coque verde se consigue extraer, por medio de la eliminación de volátiles generados mediante craqueo térmico, el hidrógeno remanente de los restos moleculares. Los dos hornos usuales donde se da lugar a la calcinación son el *cilíndrico rotatorio* y el de *solera horizontal*, este último es el más extendido. Las temperaturas que son capaces de alcanzar los hornos superan los 1200 °C. Los coques que se someten a este proceso son el coque regular, el de aguja y el de recarburación, denominándose **coques de petróleo calcinados** (CPC). En general, son coques con mayor dureza, densidad y porosidad que los coques verdes.

El único que no es sometido al proceso de calcinación es el coque de combustión, también denominado **coque verde grado de combustible**.

1.2.2. Usos del coque

Los coques calcinados son los que presentan un mayor valor añadido; tienen diversas aplicaciones industriales a nivel mundial, entre las principales se encuentran:

- Fabricación de ánodos en la industria de aluminio (coque regular).
- Producción de titanio a partir del óxido de titanio (coque de recarburación).
- Utilización en procesos industriales que requieran bajos contenidos de azufre, como en la producción de aceros especiales y metales (coque de recarburación).
- Fabricación de electrodos para hornos de arco eléctrico en acerías (coque de aguja).

Otras aplicaciones de estos coques son la producción de monóxido de carbono para la elaboración de materiales plásticos, de silicio, dióxido de manganeso o fósforo como constituyentes de electrodos de horno de arco, electrolíticos y Sodeberg.

Estas aplicaciones requieren coques muy puros, con baja o nula cantidad de heteroátomos y compuestos volátiles, alta anisotropía y bajo coeficiente de expansión térmica, de ahí que provengan de corrientes de alimentación muy limpias (J. M. Jiménez, 2007; Santos y Silva, 2008).

En el lado opuesto se encuentra el **coque combustible**, siendo el de peor condición. Como se ha mencionado antes, procede de la coquización del residuo de baja calidad resultante de destilar a vacío la parte del crudo que no lo hace previamente mediante presión atmosférica. Tiene unas propiedades muy pobres en comparación con los CPC, albergando un contenido en azufre muy elevado (4%-6%). Por lo tanto, su aplicación se limita a su uso como material combustible alternativo en cementeras, fábricas cerámicas y centrales térmicas (J. M. Jiménez, 2007).

En la figura 2 se muestran los porcentajes del mercado consumidor de coque de petróleo, donde se aprecia que tan solo un 22% del coque verde producido es calcinado para su aplicación industrial. De este porcentaje, un 73% lo absorbe la industria del aluminio (Montenegro, 2007). El restante 88% de coque verde no es apto para su valorización, y es utilizado como combustible en varias industrias, de las cuales el sector cementero es el mayor usuario, aprovechando un 40% del total del coque verde generado; lo siguen el sector de plantas termoeléctricas y la industria del hierro y el acero, con un 14% y 7% del total, respectivamente (Santos y Silva, 2008).

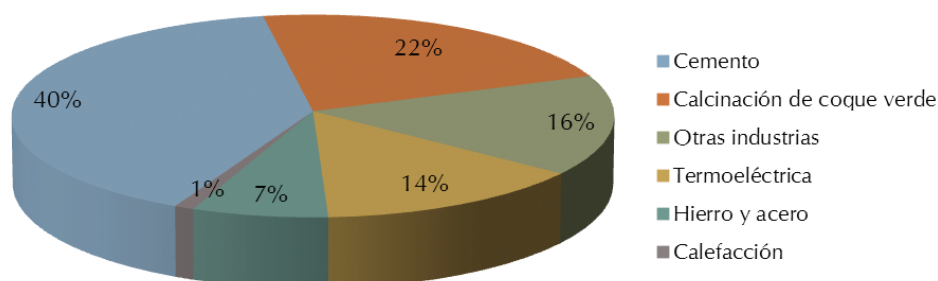


Figura 2. Mercado consumidor de coque de petróleo, en 1999 (Santos y Silva, 2008).

1.2.3. Producción mundial de coque y su problemática

La producción mundial de coque de petróleo se incrementa día a día a medida que la demanda de combustibles derivados del petróleo sigue creciendo y su calidad es progresivamente más baja. Los crudos con mayor rendimiento a combustibles son los más

caros y a veces se localizan en zonas extremadamente conflictivas, lo que promueve a las refinerías a procesar crudos más pesados. En la medida en que los petróleos son más pesados, sus densidades, en *grado API* (*American Petroleum Institute*), van disminuyendo y su contenido de contaminantes, sobre todo compuestos sulfurados, tiende a aumentar (Santos y Silva, 2008). Inevitablemente, y debido a la necesidad de satisfacer la demanda de productos ligeros e intermedios del mercado consumidor, las refinerías han ido adaptándose para procesar petróleo más pesado, a pesar de su menor rendimiento en combustibles, generando más cantidad de coque por unidad de crudo destilado y con mayor cuantía de impurezas. La producción mundial de coque de petróleo alcanzó los 81 Mt en 2001; en 2010 se incrementó en un 50%, aproximadamente, llegando a 123 Mt. La producción estimativa para el año 2015 podría llegar a superar los 161 Mt (Olmeda y cols., 2012). Sin embargo, el porcentaje de coque verde calcinable cada vez va siendo menor en detrimento de coques de calidades inferiores. Hoy en día estos últimos ya no tienen cabida en el mercado, o incluso la oferta supera ampliamente la demanda, como es el caso del coque grado combustible, que representando alrededor del 64% de la producción total de coque de petróleo (J. M. Jiménez, 2007), es el que menor comercio atesora. En efecto, el suministro de coque superó su demanda a razón de 15-20 t/año durante los últimos diez años (Global Data, 2011), y solo se espera que las cantidades de coque de petróleo de baja calidad aumenten de cara al futuro. Actualmente, como se ha mencionado, la opción habitual es destinar tales coques, debido a su alta capacidad calorífica (28-34 MJ/kg), a su uso como combustibles en centrales térmicas y cementeras. Sin embargo, incluso esta opción comienza a ser problemática; por un lado, las industrias del cemento, por ejemplo, requieren temperaturas de horno elevadas y los petróleos ofertados en el mercado actual son más pesados y, por consiguiente, contienen menos concentraciones de hidrógeno, limitando así su poder calorífico y reduciendo su valor como fuente de energía. Por otro lado, este tipo de coque posee un alto contenido de azufre y otros elementos como vanadio, los cuales pueden resultar problemáticos durante la combustión. Se estima que aproximadamente 110000 t/año de vanadio se expulsan a la atmósfera durante la combustión de combustibles fósiles (Pearson y Green, 1993). Otra consideración es que el coque de petróleo, debido a su alto contenido de carbono, produce mucho más CO_2 por unidad de masa que otros combustibles típicos (Wang y cols., 2004) y, como consecuencia de la entrada en vigor de marcos reguladores más restrictivos en cuanto a emisiones atmosféricas de contaminantes (UNFCCC, 2005; UNEP, 2009), así como de registros a nivel nacional de sustancias con potencial amenaza para el medioambiente emitidas, vertidas o depositadas (RD 508/2007), lo sitúan en posición controvertida disminuyendo su competitividad mercantil. Esto sin tener en cuenta que la co-combustión de coque grado combustible junto con carbón requiere un cuidadoso ajuste y control de sistemas de tratamiento de gases de escape para dar cuenta de las elevadas emisiones de SO_x y poder, así, cumplir con los criterios de emisión establecidos. Adicionalmente, y como ejemplo, las cenizas volantes procedentes de la co-combustión de coque de petróleo y carbón han mostrado poseer altas concentraciones de vanadio, níquel y molibdeno, entre otros metales pesados, que provienen del coque sin quemar, afectando a la calidad y, por ende, a la comercialización de las mismas (Hower y cols., 2005; Álvarez-Rodríguez y cols., 2007).

Por tanto, cualquier posibilidad de aplicación de este residuo que no suponga su utilización como combustible es de enorme interés, no solo para las propias empresas refineras, sino para la sociedad en general, al ofrecerse una ruta de eliminación de productos problemáticos sin impacto sobre el medioambiente y, al mismo tiempo, con un valor añadido.

Aparte de todo lo expuesto, cabría añadir que la tecnología del hidrógeno como fuente energética también se perfila como potencial generadora de coques. El hidrógeno podría obtenerse de fuentes renovables, tales como la descomposición fotoquímica o fotobiológica del agua, la electrolisis con energía procedente de células fotovoltaicas, aerogeneradores o energía nuclear; esta última con los inconvenientes inherentes a una fuente de origen radiactivo. En cualquier caso, esta tecnología exige al menos dos décadas de desarrollo.

Por lo tanto, las vías actualmente disponibles para generar hidrógeno parten de combustibles fósiles (metano y gas natural) por pirólisis o disociación catalítica y reformado, teniendo este último el inconveniente de generar CO_2 . Los residuos carbonosos resultantes pueden ser coques, si el catalizador es férrico, o de diferentes naturalezas con otros tipos de catalizadores. Por consiguiente, las aplicaciones que se desarrollen para los coques en la presente investigación podrían servir o adaptarse en el futuro también para los coques residuo de la generación del hidrógeno.

Como consecuencia, el aumento de la producción de coque de petróleo es un hecho, resultado natural de la disminución de la calidad de los petróleos disponibles actualmente en el mercado internacional. Esta tendencia queda reflejada con el hallazgo de grandes reservas de petróleos no convencionales, extremadamente pesados y con altos contenidos de azufre. De este modo, el presente mercado demandante de coque de petróleo debe ser ampliado, estimulando a los actuales consumidores a aumentar sus límites de uso, incluyendo nuevas tecnologías para el aprovechamiento de este subproducto.

1.3. AISLAMIENTO TÉRMICO

1.3.1. Pasado y presente

Desde tiempos inmemoriales, el hombre ha tratado de adaptar sus requerimientos al entorno donde vivía. Una de sus necesidades primarias ha sido siempre la de tener un lugar para guarecerse del sol, del frío, del viento o de la lluvia. La forma de protegerse de los agentes atmosféricos a través de la obtención y transformación de los materiales constructivos constituye una simbiosis con el medio natural, en el cual el ser humano desarrolla su habilidad y su inteligencia.

La evolución del hombre, sin duda, ha ido asociada a la de la construcción. Ya desde los tiempos prehistóricos, el hombre en sus orígenes utilizaba materiales orgánicos tales como piel de oso, plumas de ave, algodón, lana, paja e incluso el mismo cabello humano no solo como vestimenta, sino también para recubrir las cavernas o cuevas donde se alojaba con el propósito de aislarse del exterior. Este aislamiento tenía, en principio, la intención de refugiarse de las severas condiciones climáticas de la intemperie.

Más tarde, a medida que el hombre fue evolucionando, los materiales constructivos también progresaron; desde los grandes bloques de piedra de los templos egipcios, se pasó a los gruesos muros de tres hojas de la arquitectura romana, hasta llegar a la construcción medieval. Esta última se caracterizó por las grandes moles que constituían sus castillos y catedrales. Los muros que se elaboraban para las edificaciones góticas eran de gran espesor; en ellos se producía la **inversión térmica**, fenómeno por el que se mantiene el calor en el interior, a pesar de los cambios estacionales, precisamente por la acumulación de material con el que aquellos se construían. En los períodos siguien-

tes (renacimiento, barroco y neoclásico), el hombre, poco a poco, comenzó a ahorrar esfuerzo y recursos con el uso de otros materiales más eficientes en sus construcciones; como por ejemplo el asbesto, material con una gran resistencia al calor y al fuego que fue descubierto por los antiguos griegos y romanos; o el corcho, al cual G. Plinio, en el siglo I, aludió a su utilización como material aislante para techos. De igual manera, el diseño de las estructuras de los inmuebles fue evolucionando para adaptarse mejor tanto al medio como al clima de su ubicación; así, los egipcios fueron los primeros en construir cámaras en el subsuelo con la finalidad de mejorar el confort en los días calurosos aprovechando la masa térmica de la tierra.

Con el descubrimiento de la energía eléctrica, el **rendimiento energético** (entendido como la cantidad de energía necesaria para obtener las condiciones de confort deseadas) de las edificaciones, decreció. Entre los objetivos y medidas que el diseñador debía adoptar a la hora de idear una construcción, el **aislamiento térmico** se relegaba a segundo plano. Esto venía generado por una disponibilidad de la energía a muy bajo coste. Sin embargo, desde la crisis energética de los años setenta, tanto los gobiernos regionales como internacionales se han preocupado por reducir al máximo el gasto energético en todas las actividades de la sociedad.

Este principio economicista, iniciado hace tiempo, llega al máximo exponente en nuestros días: la gran masa de material se sustituye, actualmente, por **soluciones tecnológicas más eficientes** que tienen que compensar esta disminución de materiales logrando, al mismo tiempo, mejores condiciones de confort y de ahorro energético.

El concepto de **eficiencia energética** ha sido introducido recientemente en muchos campos, entre los que se encuentra el sector de la construcción. El consumo de energía primaria en usos domésticos supone alrededor de un 30% del global energético en España. Más de la mitad del total de energía empleada en edificios se destina a viviendas, y dentro de estas, la calefacción supone un 75% de la energía consumida. Por ello, uno de los objetivos presentes en construcción es diseñar edificaciones más eficientes energéticamente, optimizando el consumo de recursos, que conlleva una minimización de costes económicos a la vez que supone un compromiso con el medioambiente a través de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Este campo, de amplio desarrollo y en evolución constante, genera una gran actividad desde varios puntos de vista, como investigación, fabricación y construcción.

1.3.2. Concepto y vías de transferencia de calor

La **transferencia de calor** se puede definir como la transmisión de energía de una región a otra debido a la presencia de una diferencia de temperatura existente entre ambas. El calor se transfiere desde la región con mayor temperatura hacia la de menor, de manera estática o transitoria. En este último caso, la temperatura y/o el flujo de calor varían con el tiempo. El estado estático, sin embargo, se da lugar cuando la temperatura y/o el flujo de calor alcanzan una condición de equilibrio estable que no varía con el tiempo (Straube, 2006).

Asimismo, el flujo de calor puede darse en una, dos o tres dimensiones. En la mayoría de las situaciones reales, este acontece en tres dimensiones pero, desde una perspectiva práctica y sencilla, a menudo, es comúnmente aceptada la simplificación a una sola dimensión.

La transferencia de calor tiene lugar bajo tres mecanismos primarios, que actúan solos o combinados:

- **Transferencia de calor por conducción:** es el proceso de transmisión de calor por contacto molecular directo, dentro de un mismo componente o a través de dos materiales. La conducción térmica está determinada por la **ley de Fourier**, la cual establece empíricamente que la velocidad del flujo calorífico por conducción en una dirección dada, es proporcional a la superficie y al gradiente de temperatura entre dos caras opuestas en esa dirección, e inversamente proporcional al espesor. Esta ley puede expresarse sustituyendo la proporcionalidad por una constante denominada **conductividad térmica**, que depende exclusivamente de la composición de cada material [a]:

$$\frac{dQ_x}{dt} = Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad [W] \quad [a]$$

Donde: λ es la constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica (W/mK); A, el área de la barrera (m²); T, la temperatura (K); t, el tiempo (s); x, la longitud de la barrera (m).

Este mecanismo de transporte de calor es el más importante en los sólidos; lo es, sin embargo, ocasionalmente para líquidos; y rara vez para gases.

- **Transferencia de calor por convección:** es la propagación de calor producida por movimiento o flujo de partículas. Ocurre únicamente en materiales fluidos (líquidos o gases) entre zonas de diferente temperatura. La convección tiene lugar cuando áreas de fluido caliente (de menor densidad) ascienden hacia regiones de fluido frío. Cuando sucede esto, el de mayor densidad desciende y ocupa el lugar del fluido caliente que ascendió. Este ciclo da lugar a una continua circulación del calor (corrientes convectivas), constituyendo un importante modo de transferencia térmica entre fluidos y sólidos o, simplemente, entre fluidos.

La transferencia de calor por convección se expresa a través de la **ley del enfriamiento de Newton** [b]:

$$\frac{dQ_x}{dt} = Q = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{inf}) \quad [W] \quad [b]$$

Donde: h es la constante de Newton o coeficiente de convección (W/m²K); A_s, el área de la superficie sólida en contacto con el fluido (m²); T_s, la temperatura de superficie del cuerpo (K); T_{inf}, la temperatura del fluido lejos del cuerpo (K); t, el tiempo (s).

- **Transferencia de calor por radiación:** es el transporte de calor debido a la absorción y emisión de energía por ondas electromagnéticas a través del vacío o de un medio transparente como el aire.

La transmisión de calor, por tanto, requiere una línea de conexión entre las superficies involucradas. Todo objeto con temperatura por encima del cero absoluto radia energía calórica. La radiación es mayoritariamente importante entre sólidos y en el interior de sólidos de alta porosidad, pero esta tiene una relativa importancia para gases a altas temperaturas. La propagación de la radiación térmica tiene lugar en forma de *cuantos discretos*, teniendo cada cuanto una energía de [c]:

$$E = h \cdot \nu \quad [J] \quad [c]$$

Donde: h es la constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ Js); ν , la frecuencia de la onda lumínica (s^{-1})

A partir de esta ecuación se determina el factor que se conoce como *emisividad*, definida como la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debida a una diferencia de temperatura determinada, que da lugar a la ecuación para calcular la transferencia de calor por radiación [d]:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad [J] \quad [d]$$

Donde: ε es la emisividad (adimensional); σ , la constante de Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
 A , el área de la superficie sólida en contacto con el fluido (m^2);
 T , la temperatura de la superficie del cuerpo (K)

Los procesos de transferencia del calor por medio de conducción, convección y radiación, se producen de forma simultánea y concurrente en la naturaleza (figura 3).



Figura 3. Procesos de transferencia del calor en la naturaleza.

Así, el sol transmite calor por radiación a la tierra, donde puede ser absorbido, por ejemplo, por una pared de ladrillos. Posteriormente este es transferido por conducción a través de los mismos y por convección al aire interior llegando, finalmente, a las superficies interiores por radiación (Straube, 2006).

Sin embargo, el **proceso más importante en la transmisión de calor en la edificación es la conducción** a través de los distintos materiales que conforman el cerramiento de un elemento constructivo.

1.3.3. Conductividad térmica

La **conductividad térmica** es una propiedad de cada sustancia que expresa su capacidad para transmitir el calor por conducción. Su coeficiente (λ) representa, de forma teórica, la cantidad o flujo de calor, tomado en una muestra de extensión infinita, caras plano-paralelas y una unidad de espesor, en la unidad de tiempo y a través de la unidad de área, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de 1°C . En el Sistema Internacional de Unidades (SI) se expresa en W/mK ; y en otros sistemas también como $\text{Btu/hft}^\circ\text{F}$ ($\approx 1,7 \text{ W/mK}$) o $\text{kcal/sm}^\circ\text{C}$.

La conductividad térmica, o termo-conductividad, depende, entre otros factores, de la composición química de cada sustancia, de su estado en la naturaleza (sólido, líquido o gaseoso), de su estructura cristalina y de la temperatura y presión a las que está sometida. También influye si se trata de un material homogéneo o heterogéneo, pues en este

último caso, la conductividad varía dentro de un mismo componente. Como se ha señalado antes, esta propiedad física se utiliza, fundamentalmente, en sólidos debido a sus menores distancias intermoleculares comparadas con las de líquidos y gases.

En general, la conductividad térmica en sólidos homogéneos no varía con la presión, pero sí con la temperatura, por lo que es necesario fijar condiciones específicas para su medida.

Para sólidos no homogéneos, que en la práctica son la mayoría de materiales utilizados, y no solo en construcción, se habla de conductividad térmica aparente.

Algunos materiales tienen *conductividad anisótropa* debido a su estructura fibrosa, como la madera o el asbesto. En otros, su falta de homogeneidad está originada bien por su estructura porosa, como en la lana de vidrio o el corcho, o por la variedad de sustancias integrantes, como sucede con los materiales en base cemento (morteros y hormigones). En cualquiera de estos casos la conductividad depende de la estructura, composición, porosidad y densidad.

El inverso del coeficiente de la conductividad térmica es la resistencia térmica, que representa la capacidad de un material de oponerse al flujo del calor [e]:

$$R = \frac{1}{\lambda} \quad [\text{mK/W}] \quad [e]$$

Donde: λ es la conductividad térmica (W/mK).

Este cociente se usa cuando se buscan materiales con propiedades aislantes, de forma individual o en capas. La utilidad de este cociente radica en que el calor pase sucesivamente a través de diferentes materiales, como por ejemplo una pared formada por varias capas. En este caso, la resistencia térmica es el resultado del sumatorio de todas las resistencias medidas particularmente.

1.3.4. Mecanismos de conducción de calor en estructuras sólidas

En un sólido existen diferentes **portadores de energía térmica**, como pueden ser *fonones* (paquetes de ondas elásticas), electrones, *fractones*, fotones, par electrón-hueco, ondas de *spin*, etc. Si se considera que cada portador contribuye, de forma independiente, a la conductividad térmica, la expresión más general de la misma se define entonces como el sumatorio de todas las contribuciones individuales (Fernández-Rojas y col., 2008) [f]:

$$\lambda_{\text{total}} = \sum \lambda_n = \lambda_{\text{fonón}} + \lambda_{\text{electrón}} + \lambda_{\text{fracción}} + \lambda_{\text{fotón}} + \quad [\text{W/mK}] \quad [f]$$

Donde: λ_n es la conductividad térmica (W/mK).

De los citados portadores, los **electrones y fonones** son los más representativos. En cada elemento predominará un portador u otro o, incluso, en determinados rangos de temperatura, ambas contribuciones pueden ser significativas para un mismo compuesto.

La conductividad térmica se ve afectada por una variedad de mecanismos de dispersión de los portadores de energía térmica. La frecuencia de ocurrencia de eventos de dispersión determina, en buena medida, el flujo de transferencia de calor. El **recorrido libre medio** de los portadores queda limitado por la naturaleza de la red

estructural en un material: impurezas e imperfecciones de la red, interacción fonón-fonón, interacción electrón-fonón, entre otros.

- **Contribución fonónica:** el recorrido libre medio de los fonones está determinado, principalmente, por tres mecanismos de dispersión:
 - i. *Dispersión fronteriza:* se produce por un fonón golpeando en los límites de un sistema.
 - ii. *Dispersión de defecto de masa:* un fonón incide sobre una impureza dentro de la red, dispersándolo.
 - iii. *Dispersión fonón-fonón:* incidencia de dos fonones produciendo un acoplamiento entre ambos que limita el valor del recorrido libre medio.

Tendrá lugar un tipo u otro de dispersión dependiendo del grado de anarmonicidad estructural que posea el sistema.
- **Contribución electrónica:** los electrones libres o de conducción participan en la conducción térmica electrónica. La conductividad, en este caso, depende de la capacidad térmica de los electrones, la *velocidad de Fermi* y el recorrido libre medio. El mecanismo de transporte de calor por electrones es mucho más eficiente que la contribución fonónica debido a que los primeros no son tan fácilmente dispersados y poseen mayores velocidades.

En general, la conductividad térmica en metales está modulada por la contribución de electrones libres, aunque a altas temperaturas se hace más relevante el aporte de fonones. Estos son los principales contribuyentes a la transferencia de calor por conducción en sólidos no metálicos. En sólidos amorfos la conductividad térmica tiene, con frecuencia, un valor muy pequeño a temperatura ambiente cuando se compara con otros materiales. Esta baja conductividad es consecuencia del desorden atómico, que es responsable del camino libre medio tan pequeño de los fonones (Fernández-Rojas y cols., 2008).

La conductividad térmica es actualmente un parámetro físico de elevada importancia para evaluar las aptitudes como materiales aislantes de, entre otros, los productos destinados a la construcción ya que, de forma genérica, influye en la energía asociada a los procesos de climatización en edificios.

1.3.5. Aislantes térmicos

Un **aislante térmico** es un material, comúnmente usado en la industria y la construcción, que se caracteriza por su baja conductividad térmica, estableciendo una barrera al paso del calor entre dos medios que se encuentran a temperaturas diferentes, impidiendo que exista una transferencia de calor.

En la edificación, los aislantes térmicos se emplean, normalmente, para reducir la pérdida de energía térmica en las estructuras y mejorar el confort, reduciendo recursos energéticos y económicos asociados.

El vacío es uno de los mejores aislantes térmicos que se pueden encontrar en la naturaleza, en el cual el calor solo se trasmite por radiación; sin embargo, la gran dificultad para

obtener y mantener condiciones de vacío hace que su empleo sea exiguo. En la mayoría de los casos prácticos se utiliza aire con baja humedad, el cual impide el paso del calor por conducción (gracias a su baja conductividad térmica) y por radiación (merced a un bajo coeficiente de absorción). El aire, sin embargo, sí transmite calor por convección, lo que reduce su capacidad de aislamiento. Por esta razón, se utilizan como **aislantes térmicos materiales porosos o fibrosos**, capaces de inmovilizar el aire seco y confinarlo en el interior de celdillas de estanqueidad variable. Aunque en la mayoría de los casos el gas encerrado es aire común, en aislantes de poro cerrado (formados por burbujas no comunicadas entre sí, como en el caso del poliuretano proyectado), el gas utilizado como *agente espumante* es el que queda finalmente encerrado, siendo en estos casos, gases del tipo HCFC y CFC (hidroclorofluorocarbonados y clorofluorocarbonados, resp.), restringidos a partir del *protocolo de Montreal* (UNEP, 2009); o el dióxido de carbono, limitado a partir del *protocolo de Kioto* (UNFCCC, 2005).

La gama de materiales que se utilizan comercialmente hoy en día es muy amplia. Se podría decir que, prácticamente, existe un tipo de material aislante adecuado para cada fin arquitectónico requerido. No obstante, todos ellos tienen propiedades comunes que les confieren comportamientos especiales frente a las ondas térmicas en comparación con otros: **alta resistencia térmica, alta porosidad y baja densidad**.

Sin embargo, diseñadores, constructores y propietarios, en la actualidad, están tomando conciencia del potencial ahorro energético que existe en el **hormigón ligero**, también denominado *liviano*, utilizado como aislante de relleno para envolventes en edificaciones y construcciones en base cemento, donde el peso propio de la estructura representa una proporción importante en la carga total de la misma por lo que reducir la densidad del hormigón resulta muy beneficioso. Así se minimiza la carga muerta, con la consiguiente disminución del tamaño de los distintos elementos estructurales, llegando a los cimientos y al suelo con menores cargas. Por consiguiente, existe una demanda creciente de morteros y hormigones aligerados con altas propiedades, entre otras, de aislamiento térmico.

1.3.6. Materiales aligerados

Este tipo de materiales en base cemento albergan **densidades menores** que los fabricados con agregados comunes. Dicha disminución se produce, en estos elementos livianos, por una presencia de vacíos en el agregado, en el conglomerante o entre las partículas de agregado grueso. Un aumento de vacíos ocasiona una inherente disminución de la resistencia del elemento constructivo, por lo que muchas veces las propiedades mecánicas no son un objetivo primordial de estos materiales.

En la evolución de la arquitectura hacia el empleo de elementos más ligeros y rentables por sus prestaciones, existen numerosas investigaciones sobre la adición de diversos materiales al cemento como agregados ligeros para mejorar su conductividad térmica, como por ejemplo: celulosa, fibra de vidrio, lana mineral, poliestireno expandido, espumas de poliuretano y vermiculita (Demharter, 1998; Nicolajsen, 2005; Mihlayanlar y cols., 2008; Vrána y Björk, 2009; Zhou y cols., 2010).

A su vez, el uso de **subproductos industriales como reductores de la conductividad térmica** en materiales cementicios tiene significativas ventajas asociadas con la mejora de la eficiencia de los recursos. Estudios de relevancia han incluido trabajos sobre materiales ligeros en base cemento que contienen desechos de vidrio, ceniza volante, humo de sílice, caucho de neumáticos, arcilla expandida, papel y madera (Fu y Chung, 1997; Bouguerra y cols., 1998; Ducman y cols., 2002; Benazzouk y cols., 2008; Ng y Low, 2010).