

Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales

Mariano Vázquez Espí
Madrid, enero 2001 ¹

Aun cuando muchos de los textos publicados en esta sección de Documentos de la revista *Tecnología y Construcción* se encuentran disponibles en Internet, no dejamos de difundirlos porque los consideramos una contribución al conocimiento y al debate de asuntos neurálgicos de la arquitectura y la investigación y desarrollo tecnológico en el campo de la construcción, además de estimular a nuestros lectores a acercarse a esta discusión científica y social.

Este es el caso de este texto de Mariano Vázquez Espí, que pone sobre el tapete una reflexión sobre la construcción sostenible, que llama la atención sobre un camino para tomar en cuenta las distintas aristas frecuentemente soslayadas de este enfoque, y alerta sobre las rutas espurias que nos alejan de la construcción sostenible, si se la toma en serio como una necesidad para reducir el impacto de la actividad de la producción del medio ambiente construido sobre el entorno.

Uno de los elementos clave de este texto, además de proponer un camino de evaluación del coste físico de la construcción en todo su ciclo de vida, es enfatizar que para que tengamos en verdad construcción sostenible genuina hace falta un cambio de usos y costumbres de la operación del sector construcción, de la manera de concebir la forma urbana y edilicia, y su énfasis en considerar tanto la naturaleza física de materia empleada en la construcción (y su coste energético) como la geometría adoptada, que está asociada al mantenimiento, la durabilidad y el diseño bioclimático necesario para minimizar, ya que no se puede evitar, su impacto sobre el medio ambiente.

Aun cuando todavía hay que perfeccionar las técnicas para evaluar el impacto de la construcción sobre el ambiente, y para hacer viable la construcción sostenible, este texto nos ilumina algunos de sus caminos, no exentos de controversias que son parte este esfuerzo indispensable, no sólo para la construcción sostenible, sino para una sociedad capaz de entenderse con su entorno en medio de sus tensiones inevitables.

La idea de que los edificios de bajo consumo energético son respetuosos con el medio ambiente y de que, a través de la construcción de más edificios de este tipo, cumpliremos las promesas hechas en la Cumbre de Río de reducir las emisiones de CO2 [...], es naturalmente, una estupidez. Un nuevo edificio nunca ahorra energía, sino que genera nuevas necesidades energéticas, y la calificación de nuevo suelo para urbanizar es fundamentalmente antiecológica. Básicamente, sólo existen tres procesos que pueden conducir razonablemente a reducir las necesidades energéticas o la carga sobre el medio ambiente: la rehabilitación de edificios existentes; la sustitución de antiguos edificios ecológicamente despilfarradores por nuevas formas de bajo consumo y el cierre de intersticios entre edificios.

Moewes, 1997 citado en Verdaguer, 1999

Introducción: propósito y objetivos

A fin de cuantificar el impacto negativo sobre el ambiente de las técnicas industriales, el coste energético se ha popularizado como indicador. Se trata de un indicador cuyo principal mérito es sintetizar en una única medida un conjunto muy diverso de impactos. Así, en el actual contexto industrial con un consumo casi exclusivo de fuentes energéticas contaminantes², para procesos comparables de fabricación de un producto, el coste energético de cada uno es esencialmente proporcional a la contaminación mediante diversas sustancias (óxidos de carbono, de azufre, etc). Del mismo modo, el coste energético se considera también esencialmente proporcional al impacto sobre el territorio debido a movimientos de materiales. Incluso el ruido, en tanto que disipación energética bruta, está monótonamente relacionado con la cantidad de energía empleada. (Estevan et al. 1992) (Estevan, 1998).

El coste energético como indicador es, por su naturaleza, bastante ambiguo, pues cada autor suele contabilizar el coste de una serie de operaciones, escondidas e implícitas en el agregado final de energía. En los últimos tiempos, los métodos propuestos para el denominado ACV (Análisis del Ciclo de Vida) han sugerido la necesidad de

adoptar un estándar de medida a fin de que, a pesar de su ambigüedad, los distintos valores puedan ser comparados (aunque sólo sea a efectos cualitativos). Sin embargo, estas medidas son inevitablemente contextuales: el cambio en los procesos constructivos, la pérdida de eficiencia, la distancia a la cual los materiales son transportados, introducen variaciones en los costes energéticos agregados, variaciones cuya intensidad e importancia son siempre inciertas. Además, el ACV utiliza la agregación de costes desde “la cuna hasta la tumba” (costes de extracción, fabricación, producción y transporte de los elementos, coste de mantenimiento durante la vida útil y coste de abatimiento de los residuos hasta un estado “inerte”, no contaminante), olvidando que la renovación de los procesos exigiría estudiar la contabilidad asimétrica, “desde la tumba hasta la cuna”, analizando el coste de reposición a un estado en que los residuos vuelven a ser útiles en algún punto del proceso anterior. Sólo entonces podría hablarse con propiedad del coste asociado al diseño de procesos industriales renacientes, en el mismo sentido en que se emplea la añeja expresión bienes renacientes (Naredo y Valero, 1999).

Para solventar los anteriores problemas se cuenta todavía con la teoría general de la termoeconomía, en la que las medidas de energía útil o exergía se refieren a estados de desequilibrio termodinámico que pueden ser definidos inequívocamente, y respecto a los cuales puede calcularse el coste exergético mínimo (ligado al máximo rendimiento termodinámico de los procesos). Estas medidas tienen la ventaja de resultar menos sensibles al contexto temporal dado. Como desventaja presentan el hecho de ser valores teóricos, inalcanzables en la práctica. Para acercarlos a valores más plausibles en el mundo real hay que operar en términos de rendimientos reales, como por otra parte se viene haciendo en multitud de disciplinas de la industria para poder operar con la potencia teórica necesaria para los procesos, ajustando a valores de potencia real sólo al final de los cálculos, a la vista de los rendimientos medidos empíricamente. Puesto que el rendimiento es una fracción entre cero y la unidad, este enfoque está menos sujeto a errores de bulto que la contabilidad agregada de costes energéticos absolutos. Además, el coste exergético tiene otra ventaja importante: permite comparar el coste de los procesos en una situación que, aunque teórica, está bien definida y que corresponde además con el mínimo impacto sobre el ambiente: aquella en la que todos los rendimientos son máximos³.

Desafortunadamente, frente a este panorama teórico bastante razonable lo que se está popularizando en las revistas del sector de la construcción es la aparición de productos en sí mismos “ecológicos”, cuyas propiedades “verdes” prometen la disminución de los impactos sobre el

ambiente a la vez que aumentan la satisfacción de los usuarios, sin requerir para ello el más pequeño cambio ni en los usos y costumbres del sector, ni en la forma urbana y edilicia, ni tan siquiera la consideración integradora de los distintos productos “verdes” en el proyecto global de la obra. Algunas de las propiedades “verdes” recaban para sí un carácter mágico, tal ocurre con la “reciclabilidad”, sinónimo y paradigma de “verde” y “ecológico”, en la que se ignora que el coste energético del reciclado de materiales concretos, con nuestras actuales fuentes energéticas, puede llegar a ser tan elevado que resulte desaconsejable su uso (tal es el caso bastante obvio de los residuos de la fisión nuclear y el, no tan obvio, del cloruro de vinilo). La imagen popular que puede finalmente formarse es que bastará con cambiar de materiales para alcanzar formas sostenibles de construir, desatendiendo todos los demás aspectos de un proceso endiablidamente complejo.

El propósito de este trabajo es ilustrar a grandes rasgos la estructura general de los impactos sobre el ambiente asociados a la construcción, desentrañando las variables más significativas sobre las que prioritariamente debería incidirse, si lo que se desea es reducir significativamente tales impactos en la línea marcada por las cumbres de Río, Kioto, etc, o por el Quinto Programa de la Unión Europea, por poner unos pocos ejemplos políticamente correctos.

A fin de descender a lo concreto analizaré un material sencillo y tradicional, la tierra, puesto en comparación con otros materiales típicos como el acero o el ladrillo. La multitud de fuentes de información necesarias para la estimación del coste exergético exceden con mucho los propósitos ilustrativos de este trabajo. Aquí me contentaré con realizar un análisis cualitativo de los aspectos más significativos de la estructura del coste energético, utilizando la validación indirecta de los datos aportados por otros autores, a fin de llegar a conclusiones cualitativas significativas acerca de la idoneidad y plausibilidad del uso de la tierra como material de construcción de nuevas edificaciones en comparación con otros materiales. El ejercicio de cálculo, de todas formas, espero que sirva para entender mejor qué puede esperarse de indicadores que, como la energía incorporada, van poco a poco popularizándose.

1. Estructura del coste energético de la construcción

Resulta conveniente distinguir dos componentes fundamentales en la forma construida: la naturaleza física de la materia empleada y la geometría adoptada por esta última (así ocurre en otras disciplinas, el diseño de estructuras por ejemplo; véase Vázquez Espí, 1997, p.42). El cos-

te energético de fabricación dependerá esencialmente de la cantidad de material utilizado y de su naturaleza (intensidad energética), así como de la durabilidad general de la construcción. Por el contrario, el coste energético de mantenimiento, a igualdad de cantidad y naturaleza de los materiales, dependerá significativamente de la geometría particular con que se empleen y de la eficiencia general de sus sistemas energéticos (cuya mejora, con técnicas industriales típicas, podría incluso requerir materiales con mayor intensidad energética). En lo que se refiere al coste energético, interesa desde el principio evaluar los términos más significativos de su estructura agregada, en lo que se refiere a esas cuatro variables sintéticas: durabilidad, materiales, geometría y eficiencia⁴.

Respecto a los flujos energéticos asociados al funcionamiento de las construcciones destinadas a vivienda, puede afirmarse que en general la influencia de la naturaleza material es un orden de magnitud menor que la influencia de su geometría. Para fijar ideas, un edificio de viviendas típico en la Europa de los años 70 requiere para su construcción del orden de 1.000kWh/m² y con los sistemas típicos de la década requerirá para su mantenimiento como edificio en uso del orden de 200kWh/m² o más a lo largo de un año (Vale y Vale, 1991). Dependiendo de la vida útil del edificio, el porcentaje entre la energía de construcción y la de mantenimiento varía como sigue: para 50 años, la energía de fabricación supone un 9% del total, mientras que para 100 años la proporción se reduce al 5%: para ahorrar energía en nuevas cons-

trucciones de vivienda debe prestarse atención prioritaria a la geometría, de la que dependerá la energía gastada en el mantenimiento (cuadro 1).

Aunque el modelo lineal empleado en el ejemplo para relacionar coste de fabricación con eficiencia y, por tanto, con el coste de mantenimiento es necesariamente falso⁵, permite al menos dar una idea grosera de la tendencia principal: lo fundamental para encaminarse hacia la disminución del coste energético es la disminución de los costes de mantenimiento. Y aunque para ello lo mejor es operar sobre la geometría de la construcción, puede merecer la pena invertir simultáneamente en energía de fabricación a condición de que esté ligada a disminuciones proporcionales de la energía de mantenimiento (a través de un proporcional aumento en la eficiencia). Nótese la comparación entre los ejemplos 4b y 4c: incluso cuando el gasto total de energía se ha reducido desde el diseño inicial al 32%, una disminución a la mitad de la energía de fabricación significa tan sólo una reducción marginal del consumo total, un 5% adicional medido sobre la situación de partida.

Respecto a edificios de oficinas típicos, el coste de fabricación se estima por los mismos autores citados en 5.000kWh/m², permaneciendo esencialmente igual el coste de mantenimiento. Con estos datos, para una vida útil de 50 años, el coste de fabricación puede suponer un 33% del coste total, mientras que ese porcentaje se reduce al 20% en el caso de 100 años de vida útil. Repitamos los ejemplos anteriores (cuadro 2).

Cuadro 1

	Tipo de edificio	Fabricación (kWh/m ²)	Mantenimiento (kWh/m ² /año)	Consumo total (kWh/m ² /año)	Índice
1	Edificio típico de 50 años de vida	1000	200	220	100%
2a	Edificio con eficiencia mejorada de 50 años de vida	2000	100	140	64%
2b	El edificio anterior con durabilidad mejorada a 100 años de vida	2000	100	120	55%
3a	Edificio con geometría mejorada de 50 años de vida	1000	100	120	55%
3b	El Edificio anterior con durabilidad mejorada a 100 años de vida	1000	100	110	50%
4a	Edificio con eficiencia y geometría mejorada de 50 años de vida	2000	50	90	41%
4b	El edificio anterior con durabilidad mejorada de 100 años de vida	2000	50	70	32%
4c	El edificio anterior con fabricación mejorada a 1000 kWh/m ²	1000	50	60	27%

Cuadro 2

	Tipo de edificio	Fabricación (kWh/m ²)	Mantenimiento (kWh/m ² /año)	Consumo total (kWh/m ² /año)	Índice
1	Edificio típico de 50 años de vida	5000	200	300	100%
2a	Edificio con eficiencia mejorada de 50 años de vida	10000	100	300	100%
2b	El edificio anterior con durabilidad mejorada a 100 años de vida	10000	100	200	66%
3a	Edificio con geometría mejorada de 50 años de vida	5000	100	200	66%
3b	El Edificio anterior con durabilidad mejorada a 100 años de vida	5000	100	150	50%
4a	Edificio con eficiencia y geometría mejorada de 50 años de vida	10000	50	250	83%
4b	El edificio anterior con durabilidad mejorada de 100 años de vida	10000	50	150	50%
4c	El edificio anterior con fabricación mejorada a 5000 kWh/m ²	5000	50	100	33%
5a	Edificio con fabricación mejorada de 50 años de vida	2500	200	250	83%
5b	El edificio anterior con durabilidad mejorada a 100 años de vida	2500	200	225	75%

La conclusión principal respecto a edificios de vivienda se mantiene para los de oficinas: lo primero que debe perseguirse es la disminución del coste de mantenimiento, comenzando por mejorar el diseño (caso 3a) y la durabilidad (3b). Sin embargo, ahora, es necesario aumentar la eficiencia sin aumentar los costos de fabricación o bien aumentando a la vez la durabilidad (caso 2b): de lo contrario, los cambios podrían no representar ventaja neta (2a). En cualquier caso, la sola disminución de los costes de fabricación (a igualdad de todo lo demás) no conduce a una reducción sustancial del consumo total (5a).

Aunque desde luego la casuística es compleja, a falta de mejor información puede proponerse una regla de partida para el diseñador: comience por mejorar la geometría del edificio (arquitectura bioclimática), busque después aumentar su durabilidad, por último busque aumentar su eficiencia energética sin aumentar su coste de fabricación o bien disminuya sus costes de fabricación sin disminuir su eficiencia. La última parte de la regla no opera en edificios de vivienda (o en edificios con costes de fabricación típicamente bajos).

Como conclusión de este análisis cualitativo debe quedar clara la importancia fundamental que el diseño bioclimático del edificio tiene para el ahorro energético, y de ahí la importancia de cualquier técnica constructiva que facilite ese diseño, entre las que se encuentra las fábricas de tierra en cualquiera de sus formas. Se puede anticipar que la importancia o la ventaja de la tierra como material de construcción se deriva de forma secundaria, además de

lo anterior, de las posibilidades que ofrece para la mejora de la eficiencia energética sin aumento parejo del coste de fabricación. Por lo mismo, el uso de los "nuevos" materiales "verdes" que están apareciendo puede ser como "matar moscas a cañonazos": muchos de ellos requieren altas energías de fabricación y lo más que pueden ofrecer es aumentos en la eficiencia, y como se vió más arriba éste no es el camino más directo hacia la disminución de los impactos sobre el ambiente. Además, esta mejora en la eficiencia de los sistemas energéticos, obtenida sin el menor esfuerzo en el diseño geométrico, no ayudará mucho a que el diseño bioclimático se generalice, objetivo que sería en definitiva el más urgente.

En todo caso, la disparidad de datos existentes sobre el particular puede apreciarse mediante los consumos de energía durante la vida del edificio indicados por distintos autores, reflejados en los cuadros 3 y 4, a los que cabe añadir los 108 kWh/m² alcanzados por recientes ejemplos de edificios diseñados con la vista puesta en su eficiencia energética (Edwards, 1999). Norgard (Norgard, 1993) estima el consumo neto de calor en 210 kWh/m² para viviendas europeas de tipo "medio" construidas en 1975, 125 kWh/m² en 1990, y sugiere la posibilidad de reducirlo a 15 kWh/m² en el futuro. La discordancia también afecta a la energía necesaria para la fabricación, véase el cuadro 5. Como se ve, los datos nominales utilizados en los argumentos de más arriba al menos representan bien los ordenes de magnitud, a pesar de la disparidad.

Cuadro 3
Energía de mantenimiento de edificios
debido al consumo global de combustibles

Impacto	Consumo de combustible anual (kWh/m ²)
1	< 172
2	194
3	243
4	304
5	388
6	469

Según el programa BREEAM/New Homes version 3/91 de Gran Bretaña. Los consumos se califican por su impacto sobre el ambiente en una escala de seis puntos. (Woolley et alii, 1997)

Cuadro 4
Energía utilizada según
tipo de vivienda

Tipo de vivienda	Energía	
	Calefacción	Total
Aislada	175	275
Pareada	150	250
Ático	130	230
Adosada	100	200
Piso	60	160

Datos para Gran Bretaña, estimados para viviendas de 100 m² a partir de datos de [Edwards, 1999]. Energía en kWh/m².

Cuadro 5
Energía de fabricación de edificios

Tipo de edificio	Energía de fabricación (kWh/m ²)	Referencia
Vivienda	464	Daumal & García, 1978
Residencia de estudiantes	2222	Edwards, 1999

2. Energía incorporada en los materiales de construcción

Aunque no existe un método estándar para el cálculo de la energía incorporada en los materiales de construcción, sí existe una definición generalmente aceptada: la energía incorporada de un material incluye toda la que se necesitó en los distintos procesos necesarios para llevar el material a su lugar en el edificio: desde la extracción de las

materias primas, hasta su manufactura y erección; debe incluir la energía asociada al transporte (y a la parte proporcional de la infraestructura necesaria para que éste sea posible), así como la parte proporcional de los equipos y maquinaria necesarios para todos esos procesos (Woolley et al. 1997, p.7). En el cuadro 6 se han recogido datos aportados por distintos autores, y en la que se pueden observar tanto disparidades como desenfoces notables. A pesar de ello, son más las coincidencias que las diferencias.⁶

Cuadro 6
Energía incorporada por distintos materiales de construcción, según diversos autores.
La energía está expresada en kWh/kg de producto salvo que se indique otra cosa

Material	Referencia (año)							
	1 (1997)	2 (1982)	3 (1978) (b)	4 (1995)	5 (1998)	6 (1979) (c)	7 (2000) (e)	8 (1990)
Acero	8,06	10	7,67	7-13	7-11	13	11	14 (g)
Acero reciclado				2,5-4,17	2,5-3,3			4,7
Acero inoxidable	3,06							15
Aislantes térmicos plástico 1.125 kWh/m ³								
Aluminio	27,0			42-61	42-67	73	44-60	81 (g)
Aluminio en chapa	58	56						65
Aluminio reciclado	3,89			2,8-4,2	3-11			13-29
Áridos		0,01				0,02	0,04	
Asfalto (tela)							3	12
Cal		1,5						
Cemento		2,2	1,8			2,4	2	
Cinc		15						
Cobre (chapa)	19,4	16		19-47	20-24	22	25	
Cobre reciclado				3-22	11-14			
Fibra de celulosa	133 kWh/m ³							
Hormigón	0,28	0,2	0,5	0,2		0,3	0,7	
Hormigón ligero		0,5						
Ladrillo cerámico	0,86	1,2		0,7-1,69		0,09	1,25	
Ladrillo silicocalcáreo		0,4					0,5	
Ladrillo de tierra compactada (d)						0,02	0,13-0,4	
Lana ovina (a)	30,6 kWh/m ³							
Lana mineral	231 kWh/m ³	3,9						
Madera		0,1		1,25				
Mampostería en seco						1,4		
Plástico	45	10	2,73	22-61		2,65	20-40	21-23
Plástico reciclado				14-44				
Papel					6,51			
Plomo	52,8	14				14		
Plomo reciclado	2,78							
Poli-carbonatos								30
Poli-propilenos								20
Poli-uretanos								33,3
Porcelana		6,1					7,5	
PVC								20,7
Resinas termoestables								24
Teja cerámica plana							4,4	
Titanio						154		
Vidrio	9,19	6,0		3,6-7	3,3-8,3	7,4	5,3	22,5 (f)
Vidrio celular	4,69							
Vidrio reciclado				2,8-5,6	2,8			

Referencias. 1: [Woolley et al, 1997]. 2: [Vale y Vale, 1991] (datos de 1982). 3: [Daumal y García, 1978]. 4: [Roodman y Lenssen, 1995]. 5: [Edwards, 1999] (datos de 1998). 6: [Mazria, 1979]. 7: Estimaciones propias basadas en diversas fuentes. 8: [Estevan et al. 1992].

Notas: a: no incluye transporte. b: no incluye transporte de materias primas ni infraestructura. c: energía de fabricación. d: incluye estabilización con cemento. e: incluye transporte local, hasta 100km, en España, por carretera o ferrocarril. f: mínimo coste para vidrio en automóviles. g: piezas mecanizadas.

La energía del transporte

Puesto que la energía incorporada debe contabilizar la energía destinada al transporte de los diferentes materiales involucrados, puede resultar cuando menos chocante que los datos de energía incorporada no hagan referencia al ámbito y extensión del territorio de la economía productiva que se intenta representar. La propia definición puede parecer desafortunada al mezclar la energía de fabricación con la del transporte, pues aunque los procesos de fabricación puedan ser comparables en distintos lugares, las distancias de transporte no suelen serlo, y en consecuencia podría ser preferible diferenciar entre la energía incorporada *in situ* (un referente teórico en el que todos los procesos ocurren en el mismo lugar) y la energía de transporte en un contexto territorial y geográfico determinado.

En el caso español se cuenta desde 1992 con una estimación muy fiable del coste energético específico mínimo del transporte de mercancías (Estevan et al. 1992). Como valores medios de referencia pueden tomarse 0,46 Wh/kg/km en transporte por carretera y 0,43 Wh/kg/km por ferrocarril de ancho español (por vía estrecha es menos costoso, en la nueva vía de ancho europeo y alta velocidad sería muy superior), valores en los que están incluidos tanto los consumos directos en la etapa de tracción como los consumos indirectos por fabricación de móviles e infraestructuras, así como toda otra suerte de operaciones que son necesarias para que la producción de transporte tenga lugar (mantenimiento, reparaciones, etc). Así, el acero en la península, con viajes medios de 500km para el producto final (perfiles), requiere sólo en transporte 0,22 kWh/kg, es decir, apenas un 2% de la energía incorporada (cuadro 6, columna 7). Si las materias primas se procesan cerca del lugar de extracción, su transporte representa un coste insignificante, aun si las leyes de los yacimientos son bajas. Incluso en casos extremos, la energía del transporte no parece que pueda superar nunca a la energía de transformación *in situ*. Así, por poner un ejemplo extremo, un yacimiento de hierro en hematitas, con una ley del 10%, a 500km de la industria de transformación supondría un coste energético de transporte para la materia prima de sólo 2,2 kWh/kg de producto final, un 20% del imputado. Quizás esto explique la ausencia de especificaciones detalladas del escenario de transporte considerado en el cálculo de la energía incorporada.

Sin embargo, en cuanto la intensidad energética de un material disminuye o el tamaño del territorio mercantil se acrecienta, la fracción de la energía consumida

por el simple transporte crece inevitablemente. Así, para todos aquellos materiales que en el cuadro 6 aparecen con energías incorporadas menores que 1 kWh/kg, debe comprobarse siempre que la energía debida al transporte no descuadre las cuentas. Esta simple regla se ha aplicado en el cálculo de los datos que figuran en la columna 7 del cuadro. Si se piensa en un territorio más amplio, como la Unión Europea, las distancias medias aumentan significativamente: en el yacimiento de hierro anterior nos encontraríamos con 2.000km, y un coste de transporte del 80% del total imputado. En consecuencia, para el acero, deberíamos adoptar una energía incorporada de 20 kWh/kg, en vez de los 11 kWh/kg originales. En consecuencia, el escenario de una futura construcción sostenible tendrá como uno de sus ingredientes el carácter local de los materiales empleados.

3. Energía incorporada en fábricas de tierra

El interés de la construcción con tierra reside en la naturaleza polifacética del material (propiedades térmicas y mecánicas apreciables), y en la posibilidad de fabricarlo sin consumo de energía contaminante, debido al hecho de que en todas las fases de fabricación del adobe o tapial tradicionales es posible utilizar fuentes limpias de energía, al no ser necesario en ninguna fase del proceso el recurso a procedimientos que exijan altas temperaturas ni requerirse materiales de mayor pureza que la que presentan en los yacimientos. Es ésta la diferencia sustancial con el ladrillo cerámico común.

La característica anterior es, desafortunadamente, la desventaja principal que encuentra la reutilización de técnicas constructivas bien conocidas, dado que el contexto monetario de los países industriales penaliza fuertemente en costes monetarios toda técnica que no recurra al uso de energía contaminante y que, por tanto, no aproveche la ventaja competitiva que suponen los bajos precios de dicha energía⁷ (precios que, conviene recordar, no guardan proporción con el coste energético o con el impacto sobre el ambiente (Naredo y Valero, 1999).

El bloque de tierra compactado mecánicamente, estabilizado con aportaciones modestas de cemento portland, aparece así como una solución de compromiso entre las técnicas limpias tradicionales y las contaminantes del ladrillo cerámico habitual. Al hacer cierto uso de fuentes energéticas contaminantes, el bloque de tierra permite aprovechar ventajas competitivas monetarias a la vez que se mejoran las propiedades físicas del adobe y tapial tradicionales, con costes energéticos todavía meno-

res por unidad de producto que otras técnicas habituales comparables. Esta técnica parece pues idónea para una época de transición en la que sin duda los hábitos y costumbres de la industria de la construcción habrían de sufrir drásticos cambios. Es ésta la técnica particular que están estudiando Maldonado y sus colegas (Maldonado et al., 1999) dentro del Programa Nacional de I+D en Medioambiente, de quienes he obtenido mucha de la información para este trabajo⁸.

A fin de estimar la energía incorporada en bloques de tierra producidos en un escenario industrial, supondré siempre que sea necesario valores razonables de distintas magnitudes físicas (utilizando para ello técnicas industriales afines) y energías incorporadas por materiales comparables a los empleados. Dentro de eso, mantendré algunas características de las técnicas tradicionales, en particular el uso de materias primas locales, lo que es técnicamente factible y ambientalmente deseable. En todo caso las magnitudes utilizadas deben considerarse siempre nominales (a pesar del origen experimental o empírico de algunos de los datos, (Maldonado et al., 1999; Casanova, 2000), pues el objetivo es siempre determinar el orden de magnitud de la energía incorporada, dado que se trata de una magnitud que no puede ser «objetivamente» medida. Aquí resulta de la mayor importancia entender que la energía incorporada es una propiedad emergente, lo que añade dificultades inexistentes en la medida de propiedades objetivas («del objeto») tal y como pesos o volúmenes. Pero esto no le resta ni un ápice de «cientifidad» (Valero, 2000 pp.72-73).

Extracción de áridos. Debido a las operaciones de cribado, es necesario extraer del orden de 1,33 kg de áridos por kg de árido realmente incorporado al producto.

Adición de cemento. Se utilizará el valor 14% en peso de producto final, debido a que fue el realmente utilizado en los experimentos y que, además, representa un límite superior de la cantidad realmente necesaria. Esta cantidad debe determinarse en cada ocasión según la naturaleza de la tierra utilizada. Existe una amplia información empírica acerca de la posibilidad de estabilizar una amplísima variedad de suelos con porcentajes de cemento (u otros estabilizantes) entre un 5 y un 15% en peso, obteniéndose propiedades mecánicas comparables (véase, por ejemplo, Guinea, 1986).

Coste de mezcla y compactación. Como referencia estándar, se ha utilizado la patente *Earth Press IV de Adobe International Inc.*, empresa radicada en Nuevo México, capaz de fabricar como media 2.300 kg de bloque por hora, y como máximo 4.600 kg/h, con una potencia nominal de 18kW. Para la estimación de consumos se ha

tenido a la vista información sobre rendimientos y costes de mantenimiento de motores Diesel similares, de *Carte-pillar Inc.*, estableciéndose una proporción entre consumo de combustible estándar y potencia a plena carga de 2,24. Con todo ello, se ha estimado el coste de fabricación en 10 Wh/kg de producto. Se ha incluido aquí la energía incorporada en la propia máquina, considerando una vida útil de 10 años, así como imputaciones por mantenimiento y consumo de aceites.

Energía incorporada total. El contenido de materiales del bloque acabado se resume en:

- 82% de tierra cribada
- 14% de cemento portland
- 4% de agua.

Las distintas partidas energéticas son:

- La energía incorporada por la tierra puede sobrestimarse mediante:
 $0,82 \text{ kg/kg} \cdot 1,33 \text{ kg/kg} \cdot 0,04 \text{ kWh/kg} = 43,62 \text{ Wh/kg}$
en la que la tierra se representa mediante áridos genéricos que, en general, podrían ser más costosos en cuanto extracción, dado que casi cualquier suelo (mezcla de arena/limo/arcilla) puede ser empleado como materia prima.
- La energía incorporada por el cemento puede estimarse simplemente como:
 $0,14 \text{ kg/kg} \cdot 2 \text{ kWh/kg} = 280 \text{ Wh/kg}$.
- El coste de fabricación del bloque se estimó en 10 Wh/kg.
- Finalmente se añaden 44 Wh/kg como imputación del transporte del producto final hasta 100km de distancia (aunque incluso para viviendas unifamiliares sería menos costoso el transporte de la propia compactadora que es perfectamente transportable al no superar los 1.500 kg).

El resultado final es una energía incorporada total de 0,4 kWh/kg. Esta estimación debe ser considerada un límite superior fácilmente mejorable a la vista de la fuerte imputación en transporte. La mayor partida depende del contenido de cemento, único material que requiere altas temperatura y pureza durante su fabricación. Un límite inferior puede obtenerse con facilidad: si la energía específica de la tierra cribada se reduce a 0,02 kWh/kg, la cantidad de cemento se limita al 5% y se suprime la imputación por transporte, la energía incorporada se reduce a 0,13 kWh/kg.

Ambos límites definen una horquilla razonable para el bloque producido industrialmente, entre 0,13 y 0,4 kWh/kg, que resulta superior a la estimación de otros autores, pero que cuadra razonablemente bien con los datos disponibles para el ladrillo silicocalcáreo, compara-

ble al bloque de tierra por no requerir ninguna fase a altas temperaturas, salvo la ligada a la fabricación del cemento. La energía incorporada puede fácilmente reducirse algo por debajo del límite inferior de la horquilla, sin más que utilizar máquinas accionadas manualmente o, en general, por fuentes energéticas limpias. Sin embargo, la utilización de cemento permite vislumbrar un límite teórico a las reducciones alcanzables, que puede fijarse en torno a 0,1 kWh/kg.

4. Coste energético de las funciones constructivas

La energía incorporada en los materiales no permite todavía hacer comparaciones útiles al diseñador. En efecto, para cada función particular, la cantidad de material es muy distinta según sea el elegido, en justa correspondencia con las muy diversas propiedades físicas de cada uno. Para proceder a una elección sensata es necesario no sólo considerar el material, también debe tenerse presente la función que se espera que cumpla y la geometría del diseño elegido. Seguidamente se analizan algunas funciones típicas que el bloque de tierra puede satisfacer, realizándose comparaciones con las soluciones comunes para otros materiales habituales.

Coste energético de la compresión

La resistencia a compresión es un fenómeno que resulta ser fuertemente no lineal si se intenta resolver en estructuras de distinto tamaño mediante formas estructurales de idénticas proporciones. La no linealidad puede eliminarse para piezas muy poco esbeltas y pequeñas. En tal caso puede calcularse el coste estructural específico como la razón entre la energía incorporada en la estructura y el volumen estructural necesario, definido como el producto

de la fuerza que hay transmitir por la distancia (cf. Vázquez Espí p.1995:62). Ese coste sería el mínimo teórico alcanzable. Su cálculo es muy directo: $p \cdot x / e$, en donde p es el peso específico, e es la energía incorporada específica y f es la tensión que con seguridad resiste el material.

En el diseño real de estructuras, la no linealidad puede reducirse hasta prácticamente desaparecer si se dan dos condiciones: a) tamaños pequeños de las estructuras, para los que el peso propio estructural sea marginal respecto a la carga útil y b) uso de formas óptimas con la mayor inercia posible a igualdad de volumen de material. En lo que sigue se razonará casi al lado de esa situación límite, con soluciones habituales en acero, hormigón y bloques de tierra compactada. El escenario utilizado será un módulo típico de vivienda de 6,50 kN/m² de carga gravitatoria, de 25m² de dimensiones en planta y de cuatro plantas de 3m de altura. El volumen estructural teórico es en este caso de 4.875 m³. En el cálculo de la cantidad de material necesario se ha tenido en cuenta las dimensiones mínimas constructivas y/o estructurales cuando puedan influir. También el peso propio del soporte cuando no sea marginal como acción mecánica. Para la energía incorporada específica se han adoptado los valores medios de la columna 7 del cuadro 6. Los resultados se muestran en el cuadro 7.

El coste específico estructural de la compresión es similar para los tres materiales: mientras que en el acero se compensa su alto coste energético con su elevada resistencia, en el bloque de tierra ocurre justamente al revés. En el edificio tomado como ejemplo, el coste estructural real, algo más elevado que el teórico en los tres casos, no presenta diferencias significativas: mientras en la estructura de acero tiene cierta influencia la no linealidad en las plantas altas, en la de hormigón armado lo que tiene una influencia significativa es la dificultad de construir, en esas mismas plantas, elementos de pequeña sección que serían

Cuadro 7

Coste específico estructural de la compresión

Se analiza tanto el coste teórico como el coste real en un edificio de 4 plantas y luces de 5m, con cargas de vivienda.

	Acero en tubos	Hormigón/acero	Bloque de tierra
Tensión segura (MN/m ²)	180	7,08 / 277	1,2
Peso específico (kN/m ³)	78,5	24 / 78,5	18
Energía incorporada específica (kWh/kg)	11	0,7 / 11	0,27
Coste estructural específico teórico (kWh/mkN)	0,48	0,24 / 0,39	0,41
Energía incorporada por plantas y total (kWh)			
4.	364	480	249
3.	599	480	440
2.	833	480	693
1.	1.069	619	884
Total	2.865	2.059	2.266
Coste estructural específico (kWh/mkN)	0,59	0,42	0,46

an algo más ajustados; finalmente, en el bloque de tierra, además de la necesidad de disponer bloques en cantidad "aparejable", la no linealidad comienza a asomarse en la planta baja donde el peso propio de la estructura comienza a ser relevante.

Los resultados cuadran bien respecto a los fenómenos reales que pueden observarse en la economía de Nuevo México en USA: allí el bloque de tierra se populariza para construcciones de una o dos plantas. Y a la vista del cuadro 7, puede conjeturarse que las razones no se deben sólo al excelente comportamiento térmico del material: para esos tamaños tampoco tiene competencia en la comprensión.

Respecto a estos resultados deben hacerse algunas observaciones:

- no son directamente extrapolables a otros casos;
- en el acero no están incluidos los costes asociados a la protección frente a incendios;
- en el hormigón no se han incluido los costes asociados al encofrado y desencofrado;
- en el bloque de tierra se ha utilizado un coeficiente de seguridad más elevado que en el hormigón: la mejora en el conocimiento de la técnica (que sería propiciada por un uso más frecuente) podría en el futuro aumentar la tensión segura del material sin aumentar por ello el coste de fabricación, lo que disminuiría su coste estructural específico;
- en el bloque de tierra, a pesar del elevado volumen de material necesario, no se ha descontado el coste energético de los materiales de compartimentación o cerramiento que ya no sería necesario disponer en el edificio, ni tampoco la significativa reducción del coste de la estructura de los pisos, al ver disminuida su luz media de flexión.

En consecuencia, los resultados del cuadro 7 son optimistas en lo que respecta al acero y al hormigón: un cálculo más afinado e integrador de la globalidad de los costes del edificio acentuaría los costes de aquéllos, poniendo de relieve la mejor adecuación del bloque de tierra para tamaños pequeños.

Coste energético del acondicionamiento térmico

Si el comportamiento mecánico de un edificio es un fenómeno esencialmente simple y lineal (como acabamos de ver), su comportamiento térmico frente a un clima intrínsecamente variable resulta de una complejidad abrumadora. Debido a ello, la caracterización del coste energético del acondicionamiento térmico, en línea con el realizado para el comportamiento mecánico, excede el alcance de estas páginas.

En todo caso, existen unos pocos índices sencillos que pueden calcularse con facilidad, y que pueden ofrecer alguna pista de comparación, aunque estén lejos de dar una idea clara y concluyente sobre el fenómeno global. En primer lugar, la resistencia térmica de los cerramientos se reconoce como una propiedad deseable para evitar pérdidas o ganancias no deseadas desde el exterior de la edificación. Pero la resistencia térmica solo disminuye las aportaciones energéticas sin lograr eliminarlas. Para conseguir eliminar las aportaciones energéticas en climas o en épocas benignos se requiere acumular energía a fin de desfasar la onda térmica para acoplarla a las necesidades, a la vez que se disminuye su amplitud. Y aquí reside la parte más compleja del comportamiento térmico de las construcciones. La capacidad térmica determina la máxima cantidad de energía que puede acumularse a lo largo del tiempo de desfase⁹.

El problema de diseño térmico es, fundamentalmente, un problema de optimización vectorial en el que hay que buscar una solución de compromiso entre dos magnitudes, resistencia y capacidad, que los materiales no poseen simultáneamente. En el cuadro 8 se han calculado los costes energéticos correspondientes a las dos soluciones extremas al problema (que desde luego siempre son soluciones mejorables). De una parte se ha calculado el coste energético del aislamiento (para una resistencia térmica del elemento superficial de $1 \text{ m}^2\text{K/W}$), y por la otra el coste de la capacidad térmica superficial (para una capacidad de $1 \text{ kJ/m}^2\text{K}$). Se han analizado tres materiales "condensadores", bloque de tierra y ladrillo

Cuadro 8
Coste energético para un mismo aislamiento o una misma capacidad térmica

	Bloque de Tierra	Ladrillo macizo	Ladrillo hueco	Poliestireno
Energía incorporada (kWh/kg)	0,27	1,25	1,25	1.125 kWh/m ³
Conductividad (W/mK)	0,8	0,87	0,49	0,034
Densidad (kg/m ³)	1.800	1.200	20	
Calor específico (kJ/kgK)	0,65	0,84	0,84	1,6
Coste energético del aislamiento térmico (kWh/m ²)(m ² K/W)	389	1.958	735	38
Coste energético de la capacidad térmica (kWh/m ²)(kJ/m ² K)	0,42	1,49	1,49	35

macizo y hueco, y un típico material aislante, poliestireno expandido. Los datos necesarios se han obtenido de los resultados experimentales de Maldonado y et al., 1999 si estaban disponibles, y de la norma NBE-CT-79 y de García (1983) en otro caso.

Aunque dada la naturaleza del problema los resultados no representan las soluciones mejores, cuadran bien con la experiencia empírica de aquellas regiones donde la construcción con bloque de tierra ha vuelto a renacer. Por supuesto el bloque de tierra no puede competir en coste energético frente a los materiales aislantes, cuando esa propiedad sea muy necesaria. Sin embargo, frente a otras fábricas presenta simultáneamente menores costes tanto en aislamiento como en capacidad térmica.

Todos estos resultados sugieren que la fábrica de bloque de tierra compactada debe ser considerada como una alternativa, digna de nuestra atención, a las fábricas ahora habituales de materiales cerámicos, más intensivos en su consumo energético. En todo caso, tampoco cabe decir que el bloque de tierra sea "verde" y el ladrillo cerámico no: consideraciones detalladas (durabilidad, acabados, etc) en cada caso concreto ayudarán al diseñador a decidirse.

Coste material de las funciones constructivas

Aunque sobre la energía recae con intensidad la preocupación ambiental, no debe olvidarse que los límites materiales del planeta son mucho más estrictos que los energéticos. En el futuro, la escasez de recursos para todos los procesos liderados por la termodinámica química (entropía de mezcla, reacción, etc.) pueden aflorar con mucha más fuerza que la que han manifestado hasta ahora los límites energéticos, "habida cuenta de los stocks limitados [de recursos materiales] contenidos en la Tierra, frente al flujo continuado (de energía) que nos envía diariamente el Sol, a lo que se añade además el hecho de resultar más fácil convertir materiales en energía que en materiales" (Naredo y Valero, 1999, p.19).

Magnitudes como la energía incorporada son buenos indicadores de impacto porque, bajo la convención de medir tan sólo energía contaminante, contabilizan combustibles materiales convertidos en energía de una u otra forma. Pero si lo que se quiere medir es la cantidad de materiales incorporados, hay que añadir muchos otros a los propios combustibles. En la construcción, los propios materiales que se dejan en obra, más todas las gangas que desde la primera extracción van siendo dejadas por el camino, más todas las sustancias reactivas o no que son empleadas para la fabricación del producto final sin incorporarlas en él, etc. Actualmente, la extracción de rocas y

minerales de la corteza terrestre realizada por nuestra especie triplica la producción derivada de la fotosíntesis (Naredo y Valero, 1999, p.139). No es de extrañar por tanto que algunas personas en vanguardia se hayan adelantado, a veces por pura intuición, a lo que serán preocupaciones futuras para la mayoría. Paradójicamente, una crítica que ha recibido en ocasiones la construcción con tierra es que, precisamente, su adopción requeriría movilizar tal cantidad de materiales que el impacto resultante sería peor que el problema que se intenta resolver (Luxán, 2000, p.53).

El cálculo de lo que podríamos denominar materia incorporada es enormemente complicado y además no se cuenta en general con datos fehacientes, al contrario que en el caso de la energía. Sin embargo es posible hacer unas mínimas cuentas por defecto, partiendo de la energía incorporada y de las leyes habituales en los yacimientos minerales más comunes. La regla básica de cálculo es como sigue: para cada función constructiva se parte de la cantidad de material final necesario y de su energía incorporada. La primera se convierte en un agregado material suponiendo un valor para la ley media del yacimiento de la sustancia principal, que permite pasar de la sustancia útil a la mena que es necesario extraer, cantidad que es necesario todavía multiplicar por un factor de "estériles", es decir, aquellos materiales que es necesario remover para acceder a la mena en cuestión. Ignoraré los múltiples yacimientos de materiales a los que hay que acudir antes de obtener el producto final, lo que requeriría simplemente una contabilidad muchísimo más amplia y complicada). La energía incorporada se interpreta como energía primaria (Barracó et al., 1999, p.43) y se transforma en recurso material primario mediante una regla simple: 1kWh. en tanto energía incorporada equivaldrá a 80 g. de petróleo, lo que a su vez requiere extraer 100g. de material en el yacimiento¹⁰. Los distintos materiales así obtenidos se agregan en una cantidad total (sin tener en cuenta que se trata de materiales de muy distinta naturaleza, véase más adelante).

En el cuadro 9 doy los factores que permiten pasar de la sustancia útil empleada (hierro, arcilla, tierra) a la cantidad total de material removido (la propia sustancia, la ganga de la mena, y los estériles, véase el amplio estudio de Naredo y Valero (Naredo y Valero, 1999), es decir, el coste material específico de la materia del producto final.

En el cuadro 10 comparo el coste material de la compresión estructural según se elija acero o bloque de tierra. A la vista está que una "torre eiffel" de tierra hubiera tenido mucho mayor impacto material que la que todavía conservamos (de haber sido factible). Allí donde la

compresión sea la única función requerida por la construcción, el impacto material se reduce al emplear materiales especializados como el acero: los postes del telégrafo fueron en el pasado de madera, y puede que lo vuelvan a ser en el futuro, pero en cualquier caso no cabe esperar que sean nunca de tierra.

En un edificio, sin embargo, la función estructural en general, y la compresión en particular, es marginal respecto a los impactos sobre el ambiente (véase el apartado 1). Para enjuiciar mejor el bloque de tierra compactada, podemos compararlo en términos de capacidad térmica, una función importantísima en nuestros climas y en la que cualquier fábrica destaca, y que será encomendada normalmente a fachadas y muros, junto a losas y suelos. En el cuadro 11 se refleja la contabilidad para el bloque y también para el ladrillo hueco, su más claro competidor. La conclusión es que ambos materiales acarrearán impactos materiales similares a igualdad de capacidad térmica aportada (dado el carácter borroso de los cálculos y aunque la fábrica cerámica involucra un 50% más de materiales que el bloque de tierra). Y, en consecuencia, la crítica a la construcción con tierra por gran consumidora de materiales no parece tener mucho fundamento si nos esforzamos en comparar funciones y prestaciones iguales.

Conviene dejar claro que estos cálculos sencillos son groseras aproximaciones que tan sólo pueden servir como primeras referencias cualitativas. Es muy importante notar que no es lo mismo gastar un kilogramo de petróleo (una rareza biológica en la corteza terrestre) que un kilogramo de hierro (dada su composición, como media sería necesario remover 20 kilogramos de tierra para extraer de ellos, a través de procesos energéticamente muy costosos, tal cantidad de metal) o un kilogramo de tierra (si está suelta casi cualquier tierra sirve para compactarla: lo único necesario es tener el conocimiento de cómo y con qué estabilizarla: esa es la sabiduría que atesoraban las hoy prácticamente desaparecidas culturas vernáculas). Quizá el mayor mérito de la termoeconomía es haber puesto de relieve esa diferencia a través del coste exergético.

En todo caso, no debe olvidarse que este coste material es el de fabricación, y que la parte del león sigue estando en el mantenimiento. Los 200kWh/m² del mantenimiento de un edificio de viviendas representan del orden de 50kg/m² sólo en combustibles cuando el servicio energético es "todo eléctrico". A lo largo de, por ejemplo, 100 años, nos encontramos con la muy respetable suma de 5.000kg/m² en combustibles, respecto a los que el peso propio del edificio comienza a ser marginal (incluso si se tratara de una edificación masiva de gruesos muros, de unos 1.200kg/m²).

Cuadro 9
Coste material específico de diversos productos finales.
Incluyendo la ganga de la mena y los materiales estériles.

Material útil	Coste material específico (kg/kg)
Hierro	6
Cobre	240
Arcilla para ladrillo cocido	2,5
Bentonita	8
Tierra para compactar	1,33
Yeso	6

Fuentes: Naredo y Valero, 1999; Maldonado et al., 1999, Casanova, 2000.

Cuadro 10
Coste material específico de la compresión

	Acero en tubos	Bloque de tierra
Coste energético (kWh/mkN)	0,59	0,46
Producto final (g/mkN)	53,6	1.700
Material por combustibles (g/mkN)	59	46
Sustancia principal (g/mkN)	53,6	1.632
Gangas y estériles (g/mkN)	268	539
Coste material (g/mkN)	381	2.217

Elaborada a partir de los cuadros 7 y 9.

Cuadro 11
Coste material específico de la capacidad térmica

	Ladrillo hueco	Bloque de tierra
Coste energético (kWh/kJ/K)	1,49	0,42
Producto final g/(kJ/K)	1.190	1.560
Material por combustibles g/(kJ/K)	149	42
Sustancia principal g/(kJ/K)	1.190	1.498
Gangas y estériles g/(kJ/K)	1.785	494
Coste material g/(kJ/K)	3.124	2.034

Elaborada a partir de los cuadros 8 y 9.

Conclusiones

Si vamos a seguir construyendo edificios al ritmo actual y, a la vez, deseamos reducir los impactos sobre el ambiente, se nos presenta una tarea enormemente difícil para la que se pueden extraer de lo anterior algunas conclusiones útiles.

1. Los esfuerzos a favor de una construcción sostenible deben dirigirse a disminuir el coste de mantenimiento de los edificios. La prioridad debe otorgarse al diseño bioclimático o integrado en su medio ambiente (Luxán et al., 1997; Luxán, 2000), que en los climas peninsulares podrían proporcionar drásticas reducciones de los consumos. En segundo lugar, debe mejorarse la durabilidad de los edificios y la eficiencia de los sistemas energéticos activos. Todo ello puede hacerse con materiales tradicionales o con nuevos, siempre que estos no incorporen energía desproporcionadamente a sus posibles ventajas. La discusión sobre el carácter "verde" de los materiales debería reservarse a aquellos que pueden ser tóxicos o muy contaminantes en cualquier plazo temporal.
2. Mientras que la energía incorporada permanezca cercana a los valores de los materiales más habituales para cada función, la energía del transporte es marginal si el tamaño del territorio económico es local. Tanto si el territorio económico se agranda, como si la intensidad energética disminuye (vuelta a los materiales tradicionales, por ejemplo), la energía del transporte será proporcionalmente más importante: cualquier escenario futuro para una construcción sostenible debe contemplar el uso de materiales disponibles localmente.
3. Aunque un cálculo fino de la energía incorporada en un material puede ser tan costoso que resulte desalentador, pueden establecerse dos reglas cualitativas básicas de mucha ayuda para el diseñador: la presencia de componentes que exigen altas temperaturas en su fabricación o altos grados de pureza respecto a la composición media de la corteza terrestre (o ambas cosas a un tiempo) permiten vaticinar costes energéticos altos.
4. El coste energético específico de un material no tiene significado, salvo cuando se relaciona con la cantidad de material requerido por la función constructiva encomendada. En general, si las prestaciones requeridas no son extremas, los materiales polifuncionales (es decir, los que permiten construir elementos constructivos que resuelven simultáneamente varias funciones) deben preferirse a los materiales especializados: por ejemplo, para pocas plantas deben preferirse muros de carga a estructuras porticadas. Cuando las prestacio-

nes requeridas son altas, los materiales especializados pueden compensar su alto coste energético con sus elevadas propiedades físicas. En todo caso, la evaluación energética de la construcción debe hacerse globalmente, en el más elevado grado de agregación que sea posible, incluyendo tanto el coste de fabricación como el coste de mantenimiento.

Corolario: no existen ni existirán materiales ecológicos. Incluso el uso de la madera puede ocasionar fortísimos impactos. La cualidad de lo ecológico, o de lo sostenible, puede predicarse de una cultura determinada, también de una cultura técnica.

5. El impacto material, como impacto directo sobre los distintos territorios que soportan yacimientos, no es, en el caso de la fabricación, proporcional al coste energético correspondiente. Puesto que la materia incorporada incluye el consumo de combustibles, podría en el futuro ser preferido a la energía incorporada como indicador sintético. Sin embargo, dado su carácter agregado de materiales de naturaleza muy distinta, el coste energético definido por la termoeconomía debería ser preferido en su lugar. En este orden, la investigación debería orientarse hacia la redacción de bases de datos "exergéticos" de los materiales, elementos y sistemas constructivos, una labor no menos tediosa que la redacción de bases de datos sobre rendimientos y precios de unidades de obra, pero en la que nos jugamos mucho más nuestro futuro técnico (Verdaguer, 1999).
6. Cuando se realiza una evaluación global, incluyendo fabricación y mantenimiento, casi cualquier indicador vale, pues mientras el coste de fabricación siga siendo marginal, existe proporcionalidad groseramente aproximada entre el coste energético y el coste material totales.

Hay una última consideración que, aunque debía haber sido previa, he decidido dejar para el final: la población humana de este planeta dejará de crecer o se reducirá a cero. En el primer caso y con edificios en los que se haya cuidado su durabilidad (conclusión 1), llegará un momento en el que sólo haga falta rehabilitar o reutilizar, en el que la obra nueva sea una rareza, no la regla (véase Moewes, 1997; Verdaguer, 1999). Con unas 250.000 viviendas vacías en un área urbana como Madrid, de muy diversa habitabilidad y antigüedad, y con una población prácticamente estable, quizá hemos llegado ya a ese punto¹¹. Si así fuera, ya se comprende que lo que más necesitaría la sostenibilidad en el sector de la construcción es una radical reorientación de la política inmobiliaria e industrial en nuestro país. Pero mucho me temo que la docta discusión que he intentado en este trabajo es perfectamente inútil para conseguirla.

Notas

1 Trabajo publicado en *Informes de la Construcción*, vol. 52, nº 471. Tomado para esta publicación del sitio web de la Biblioteca CIUDADES PARA UN FUTURO MÁS SOSTENIBLE. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. España.

<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n20/amvaz.html>

2 Se usa el término popular. Desde un punto de vista termodinámicamente más estricto debe entenderse por "contaminante" toda aquella fuente energética cuyo origen primario en el momento de la extracción es el propio planeta. En efecto, al ser el planeta, básicamente, un sistema cerrado en su ciclo material, el uso de tales fuentes energéticas acarrea siempre, de manera inevitable, la producción de contaminación ambiental de muy diverso tipo. Cosa distinta es que los efectos de tal contaminación tarden tiempo en manifestarse [Vázquez, 1997 p.38].

3 Véase sobre el coste exergético la obra citada de Naredo y Valero. La teoría general de la termoeconomía recibió el premio Edward F. Obert de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) y hoy por hoy es un área de investigación en vanguardia: en nuestro país destaca el Centro de Investigación del Rendimiento de Centrales Eléctricas (CIRCE) de Zaragoza.

4 En teoría, la geometría influiría muy significativamente tanto en el coste de mantenimiento como en el de fabricación si se pudieran emplear formas óptimas para cada función constructiva. Pero dado el carácter multifuncional de un edificio, la forma óptima para una función concreta suele ser no-óptima (si es que no es pésima) para otras. De suerte que rara vez pueden emplearse formas óptimas, tal es el caso de las formas óptimas estructurales que a lo más sirven de referente en el diseño [Vázquez, 1995]. Sobre la relación entre la geometría y el ahorro energético [Luxán, 2000, pp.50-51].

5 Aunque esa falsedad debe entenderse bien: cualquier modelo matemático de esa relación puede expresarse mediante un desarrollo en serie cuyo primer término es siempre lineal.

6 Aunque en el cuadro 6 sólo se dan las referencias consultadas, se han rastreado las referencias bibliográficas de las fuentes secundarias, a fin de eliminar distintas referencias a los mismos datos de partida. En consecuencia, y salvo errores en las referencias, para cada material o producto, cada dato en la tabla proviene de un cálculo, estima o comprobación independiente de los demás. Los datos de la columna 7 cuadran bien con los aportados por la Guía de la edificación sostenible del Ministerio de Fomento (MFOM, 1999, pp. 64 y 65). Nótese que la energía incorporada sólo es una parte del coste energético a tener en cuenta con el método ACV y, por supuesto, no cubre el coste exergético total. Pero a pesar de todo es un indicador cuyo uso va siendo cada vez más frecuente y que tiene ya dos décadas de antigüedad.

7 El incremento del precio del petróleo a lo largo del año 2000, importante en términos porcentuales, no altera en absoluto el hecho de que las fuentes energéticas contaminantes son muchísimo más baratas que otros factores productivos, en general menos contaminantes, como la mano de obra.

8 Debe quedar claro, sin embargo, que salvo la aportación necesaria de cemento, todo el proceso de fabricación del bloque de tierra puede llevarse a cabo con el sólo concurso de energías limpias, un objetivo al que debería tenderse en el escenario de una evolución de la técnica hacia su mejora.

9 Esta última parte del problema es el problema. Desafortunadamente la correspondiente norma básica de la edificación y la futura certificación energética de los edificios se desentienden de él [Luxán, 2000].

10 Para dar una idea de la imprecisión de esta interpretación, nótese que si en vez de energía primaria se tratara de energía útil y si el servicio energético fuera "todo eléctrico", 1kWh requeriría del orden de 250g de petróleo. Pero frecuentemente no está bien especificado si los datos de la tabla 4 se refieren a energía primaria o energía útil y, por tanto, la interpretación es necesaria.

11 La disfunción es tan notable que de los más de tres millones de viviendas construidas en España en la década de los ochenta, medio millón largo quedaron vacías, desocupadas, lo que representa la sexta parte del total contruido. De hecho, de esos tres millones, no llegaron a dos el número de viviendas destinadas a residencia principal de una familia, [cf. Naredo et al., 2000].

Referencias bibliográficas

- Barracó, Helena et al., (1999) *Barcelona 1985-1999: ecología d'una ciutat*. Ajuntament de Barcelona.
- Casanova Ramón-Borja, Andrés (2000) Carta del 13-8-2000. Director técnico de Tejas Borja S.A.
- Daumal, Francisco y Gerardo García (1978) "La energía y el ciclo vital del edificio" *CAU* nº 50, pp 30-37.
- Edwards, Brian (1999) *Sustainable Architecture*. European Directives & Building Design Oxford: Architectural Press
- Estevan, Antonio; Mercedes Llop; Marta Román; Alfonso Sanz y Pilar Vega (1992) Análisis comparativo de externalidades y condicionantes de la competitividad por modos de transporte (Madrid: Dirección General de Planificación Interregional de Grandes Infraestructuras. Ministerio de Obras Públicas y Transporte)
- Estevan, Antonio (1998) "El nuevo desarrollismo ecológico", *Archi-piélagos* nº 33, pp 47-60.
- García, Arturo (1983) Bases para el diseño solar pasivo. Instituto Eduardo Torroja. Centro Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Guinea Díaz, María Jesús (1986) "La tierra, material resistente al agua" en *La tierra, material de construcción*, Monografía 385/386. Madrid: IETcc.
- Luxán, Margarita de (2000) "Arquitectura eco-lógicamente consciente", *Arquitectos*, número 155, pp. 48-55.
- Luxán, Margarita de et al., (1997) "Criterios y datos básicos para el diseño de la arquitectura bioclimática en Andalucía", en *Arquitectura y clima en Andalucía*, Juan Vázquez (ed.) Junta de Andalucía, Sevilla.
- Maldonado Ramos, Luis (investigador responsable) et al. (1999) Determinación del rendimiento y coste energético en la construcción de cerramientos de fábrica de adobe, bloque de tierra comprimida y entramado, para su aplicación en proyectos de desarrollo sostenible y política medioambiental. Acción especial: Memoria. Programa Nacional de I+D en Medioambiente. CICYT. Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la UPM.
- Mazria, Edward (1979) *The Passive Solar Energy* (Emmaus: Rodale Press Inc. (Se cita la traducción castellana, El libro de la energía solar pasiva. Gustavo Gili, México, 1983).
- Moewes, Gunther (1997) "Solar, defensiv ober beides?", *Detail*, 3/1997.
- Naredo, José Manuel y Antonio Valero (directores) (1999) *Desarrollo económico y deterioro ecológico*. Fundación Argentaria. Madrid
- Naredo, José Manuel et al. (2000) *Composición y valor del patrimonio inmobiliario en España, 1990-1997*. Ministerio de Fomento. Madrid.
- Norgard, Jorgen S. (1993) "Energía para el confort personal: opciones eficaces y límites" en *Energía para el mañana: conferencia sobre «Energía y equidad para un mundo sostenible»*. AEDENAT. Los libros de la Catarata. Madrid.
- Roodman, David M. y Nicholas Lenssen (1995) *A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns Are Transforming Construction*. Washington: World Watch Institute. Se cita la traducción castellana, *Revolución en la construcción*, Bilbao: Bakeaz, 1997).
- Vale, Brenda y Robert Vale (1991) *Green architecture. Design for a sustainable future*. London: Thames & Hudson.
- Valero, Antonio (2000) "El marco termodinámico para iluminar la sociedad actual", en *Economía, ecología y sostenibilidad en la sociedad actual*, José Manuel Naredo y Fernando Parra (eds.) Siglo XXI. Madrid.
- Vázquez Espí, Mariano, 1995, "Un nuevo algoritmo para la optimización de estructuras: el recocido simulado" *Informes de la construcción*, nº 436, pp 49-69.
- Vázquez Espí, Mariano (1997) "Sobre la enseñanza y la práctica de la teoría de estructuras", *Informes de la construcción*, nº 449, pp 37-49.
- Verdaguer, Carlos (1999) "Paisaje antes de la batalla. Apuntes para un necesario debate sobre el paradigma ecológico en arquitectura y urbanismo", *Urban*, número 3, pp. 29-43 (ahora también en <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n13>)
- Woolley, Tom; Sam Kimmins; Paul Harrison y Rob Harrison (1997) *Green Building Handbook*. London: E & FN Spon.