

Análisis comparativo en base a la sostenibilidad ambiental entre bóvedas de albañilería y estructuras de hormigón

Comparative analysis on environmental sustainability between masonry vaults and concrete structures

Justo García Sanz Calcedo*¹, Manuel Fortea Luna*, Antonio M. Reyes Rodríguez*

* Universidad de Extremadura. ESPAÑA

Fecha de recepción: 20/ 09/ 2011
Fecha de aceptación: 05/ 03/ 2012
PAG. 05 - 22

Resumen

En este trabajo se compara desde una perspectiva de sostenibilidad, el impacto medioambiental de una estructura de fábrica horizontal de albañilería mediante bóveda de arista, respecto a un forjado estructural de hormigón armado de tipo reticular, utilizando técnicas basadas en el Análisis del Ciclo de Vida para cuantificar la energía consumida en el proceso de fabricación de los materiales y construcción de la estructura. Se ha detectado que la bóveda consume un 75% menos de energía en el proceso de construcción, emite un 69% menos de CO₂ a la atmósfera, tienen un coste medio de fabricación para pequeñas luces similar al de un forjado convencional e inferior cuando se trata de salvar grandes luces, genera un 171% menos de residuos procedentes de embalaje en obra, aunque es necesario más cantidad de mano de obra y que ésta sea más especializada. Se demuestra que la construcción abovedada satisface con creces las exigencias actuales en cuanto a sostenibilidad, así como que esta técnica constructiva puede convivir con la tecnología propia de la sociedad actual, dando como resultado un producto de altas prestaciones económicas, funcionales y energéticas.

Palabras Clave: Construcción sostenible; eficiencia energética; ecodiseño; ACV; bóveda

Abstract

This paper compares, from a sustainability perspective, the environmental impact of a masonry arris vault with respect to a reticulated reinforced concrete slab, using techniques based on the Life Cycle Assessment to quantify the energy used in the manufacturing process of materials and in the construction of the structure. It has been detected that the vault consumes 75% less energy in the construction process, it emits 69% less CO₂ into the atmosphere, it has an average manufacturing cost for short spans similar to a conventional slab, but much lower when large spans have to be covered, and it generates 171% less packaging waste from works, but it needs a larger and more skilled labor force. This paper shows that the vaulted building fully meets the current sustainability requirements and that this construction technique can coexist with the technology characterizing today's society, resulting in a product with high economic, functional and energy performances.

Keywords: Sustainable building; energy efficiency; eco-design; LCA; vault

1. Introducción

La práctica totalidad de los edificios que se construyen en los países desarrollados se hacen con estructuras de hormigón armado de tipo reticular, con forjados unidireccionales o con losas. La utilización de la bóveda como elemento de sustentación cayó en desuso durante el primer tercio del siglo XX, quedando relegada a rehabilitaciones de edificios históricos (Di Cristiano Crucianelli, L. et al., 2000), o edificación rústica. Sin embargo, son todavía numerosas las construcciones abovedadas en Extremadura. Viviendas, iglesias, edificios institucionales, simples locales de trabajo o reunión, permiten que sus habitantes, sobre todo en el medio rural, pasen gran parte de sus vidas cobijados en ellas.

1. Introduction

Practically all buildings in the developed countries are built with reticulated reinforced concrete structures, with unidirectional slabs. The use of vaults as a support element became obsolete during the first third of the 20th century, being used only in the reconditioning of historical buildings (Di Cristiano Crucianelli, L. et al., 2000), or rustic constructions. Nevertheless, in Extremadura there are still several vaulted constructions; its inhabitants, especially in the rural environment, spend a great deal of their lives sheltered in this type of houses, churches, institutional buildings, and simple work or assembly places.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: jgsanz@unex.es

La bóveda (Moya y Blanco, 1993) la encontramos permanentemente en cualquier lugar: plazas porticadas, casas de encomienda, conventos, ermitas, pozos de agua y de nieve, secaderos, cementerios, aljibes, harineras, hornos, norias, puentes, almazaras, molinos, apriscos, cuadras, zahurdas, cloacas, etc. Tanta proliferación no puede ser ni caprichosa ni casual; es la expresión o resultado de haber encontrado una estructura eficaz y versátil, capaz de solventar multitud de situaciones con pocos recursos (Fortea y López Bernal, 2001).

El hormigón armado es una tecnología relativamente reciente que se instaló con rapidez y gran virulencia desplazando depredadoramente a cualquier competidor. Las primeras noticias sobre su existencia son de mediados del siglo XIX cuando William Wilkinson patentó un sistema que incluía en su interior armaduras de hierro (Miquel López, 2008). Durante medio siglo se mantiene en período de experimentación, para irrumpir con energía coincidiendo con el nuevo siglo. En 1900 se construye el primer edificio con hormigón armado.

En 1913 en Baltimore (USA) se suministra por primera vez hormigón preparado y tres años más tarde aparece el camión-cuba que hoy conocemos. En 1929 Wright construye el primer rascacielos de hormigón, y en 1958 Dodge Corporation de New York publica "Las estructuras de Eduardo Torroja", auténtica "biblia" del hormigón armado, libro de texto obligado para todos los ingenieros y arquitectos con intención de proyectar cualquier construcción. En España, el primer edificio de entidad construido con hormigón armado es la fábrica de harinas La Ceres en Bilbao, de 1899-1900.

Aún hoy, después de la aprobación del Código Técnico de la Edificación de España en 2006, como compendio casi enciclopédico de todas las técnicas edificatorias (CTE, 2007), las bóvedas siguen sin tener un hueco en ese documento. El entorno jurídico-normativo no reconoce la existencia de las bóvedas, lo que implica en la práctica la prohibición de su utilización como parte estructural de un edificio, permitiéndose solamente como elemento ornamental.

El arco, y sus derivados la bóveda y la cúpula (Huerta, 2004), constituye uno de los recursos constructivos más ingeniosos que ha producido el ser humano en "su larga lucha contra las tracciones" (León González, et al; 2007). Condicionado por la necesidad de seguir utilizando materiales pétreos, el constructor tuvo que ingeniárselas para dar con las formas que aseguraran estabilidad y durabilidad, conjugando tal propósito con el de la viabilidad del proceso constructivo y la economía.

The vault (Moya and Blanco, 1993) is seen permanently in every place: arcaded squares, houses of the encomienda, convents, hermitages, water and snow wells, drying sheds, cemeteries, cisterns, flour mills, ovens, chain pump wells, bridges, oil-mills, mills, pens, stables, pigpens, drains, and so on. Such a proliferation can be neither capricious nor casual; it is rather the expression or result of finding an efficient and versatile structure, which is able to solve a wide range of situations with little resources (Fortea and López Bernal, 2001).

Reinforced concrete is a relatively new technology that was quickly adopted and with great virulence, eliminating all competitors in a ravaging way. The first news regarding its existence dates from the middle of the 19th century, when William Willkinson patented a system with iron reinforcements in the interior (Miquel López, 2008). For half a century it underwent an experimentation period, bursting in strongly at the beginning of the new century. The first building with reinforced concrete was built in 1900.

In 1913, prepared concrete was supplied in Baltimore (USA) for the first time, and three years later the truck mixer as we know it today showed up. In 1929, Wright built the first concrete skyscraper, and in 1958, the New York Dodge Corporation published "The Structures of Eduardo Torroja", a genuine "bible" of reinforced concrete, a mandatory text for all engineers and architects intending to design any kind of construction. In Spain, the first corporate building built with reinforced concrete was the flour manufacturing company La Ceres in Bilbao, from 1899-1900.

Even today, after the approval of the Spanish Technical Construction Code in 2006, as an almost encyclopedic compendium of all construction techniques (CTE, 2007), vaults are still missing in that document. The juridical regulatory field does not acknowledge the existence of vaults, which practically means that it is forbidden to use them as a structural part of a building, remaining only as a decorative element.

The arch, and its derivations the vault and the dome (Huerta, 2004), is one of the most ingenious constructive resources produced by the human being in "its long struggle against tractions" (León González, et al; 2007). The builder, conditioned by the need to use rocky materials, had to use his wits to discover new ways for ensuring stability and durability, harmonizing this purpose with that of feasibility and economy of the constructive process.

La competición en el mercado entre las estructuras de fábrica de ladrillo tradicional y las estructuras de hormigón armado, hasta ahora se ha saldado con una victoria de estas últimas aparentemente por razones de coste (Heyman, 1995), el cambio climático, la emisión de CO₂ y en definitiva el mercado energético mundial, obligan a nuevos planteamientos respecto a los recursos. Empieza a ser necesario considerar en todos los procesos los saldos energéticos, de emisiones de gases contaminantes, y de emisiones de residuos, además de los saldos estrictamente económicos, obligando a monetarizar los efectos nocivos para el medio ambiente.

La energía consumida en los procesos de fabricación y construcción es un factor inherente a cualquier tipo de actividad, implica modificación del entorno y conlleva una serie de impactos ambientales reconocidos. Por ejemplo, el consumo de energías fósiles comporta la emisión de CO₂ a la atmósfera, lo que puede contribuir al calentamiento global del planeta. El sector de la edificación representa uno de los sectores con mayor incidencia en las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, emisión en su mayor parte debida al elevado consumo energético (Ministerio de Economía, 2003).

Aunque existen muchos antecedentes de estudios que han evaluado el consumo energético de la edificación y su impacto ambiental asociado (Cuadrado-Rojo y Losada-Rodríguez, 2007), en lo que respecta a sistemas abovedados basados en la construcción tradicional no se han encontrado antecedentes, a excepción de trabajos previos desarrollados por los autores (Rodríguez, 2010; Fortea y López, 1998)

El objetivo de este trabajo es comparar desde una perspectiva de sostenibilidad, el impacto medioambiental de un forjado estructural realizado con hormigón armado de tipo reticular, con una estructura de fábrica horizontal de albañilería mediante bóveda de arista, utilizando técnicas basadas en el Análisis del Ciclo de Vida, para cuantificar la energía consumida en el proceso de fabricación de los materiales, en el proceso construcción de la estructura, así como otras variables directamente relacionadas con el proceso constructivo.

2. Metodología

Para analizar como influye la tipología de la estructura en las variables medioambientales, se han escogido una serie de bóvedas y forjados reticulares con distintas hipótesis de luces, cuya tipología y composición se describen detalladamente en el apartado 2.1.

Until now, the market competition between traditional brick structures and reinforced concrete structures has given a victory for the latter, apparently for cost reasons (Heyman, 1995). Climate change, CO₂ emissions, and the global energy market, force us to make new approaches with regard to resources. Currently, we should consider the energy balances in all processes, the emission of contaminant gases, and residues' emissions, in addition to the strictly economical balances, which force us to monetize the harmful effects on the environment.

The energy consumed in the manufacturing and building processes is a factor inherent to all types of activities; it implies changes in the environment and results in a series of known environmental impacts. For example, fossil energy consumption entails the emission of CO₂ into the atmosphere, which can contribute to the planet's global warming. The building sector represents one of the sectors with the greatest bearing on the carbon dioxide emissions into de atmosphere, mainly due to the high energy consumption (Ministry of Economy, 2003).

Although there are many available data from studies that have evaluated the construction energy consumption and its associated environmental impact (Cuadrado-Rojo and Losada-Rodríguez, 2007), no references on the vaulted systems based on traditional building have been found, except for previous works developed by the authors (Rodríguez, 2010; Fortea and López, 1998).

The purpose of this paper is to compare, from a sustainability perspective, the environmental impact of a structural slab made with reticulated reinforced concrete, with horizontal masonry structure through arris vault, using Life Cycle Assessment techniques to quantify the energy consumed in the manufacturing process of the materials, the structure's building process, and other variables directly related with the constructive process.

2. Methodology

In order to analyze how the structure typology influences the environmental variables, a set of vaults and reticulated slabs with different span hypothesis were selected, whose typology and composition are described at length in paragraph 2.1.



A continuación se han definido una serie de hipótesis de cálculo y de cargas, que han sido la base para calcular cada una de las estructuras, modelizando una serie modular de 4x4, 5x5, 6x6, 7x7 y 8x8 m para posteriormente analizar el comportamiento de estas estructuras conforme aumenta la distancia entre ejes.

Una vez identificados los esfuerzos y las sollicitaciones de cada una de las anteriores estructuras, se ha procedido a su dimensionado, para posteriormente realizar un recuento de los materiales, mano de obra y medios auxiliares que conformarán la estructura. Posteriormente se ha realizado un inventario de ciclo de vida de cada uno de los materiales, utilizando las técnicas basadas en el análisis de ciclo de vida que se describen en los siguientes apartados.

2.1 Tipologías analizadas

En el estudio se ha utilizado bóvedas de arista de planta cuadrada de sección elíptica de flecha 1/5 con un canto de la hoja de 0.06 m. Es decir, en una bóveda de 5x5, a una longitud de 5 m. le corresponde una flecha de 1.67 m. Se trata de una bóveda tabicada (Riccardo Gulli, 1995), que está compuesta de varias hojas, la primera de ladrillo colocado de canto y tomada con mortero de yeso, y las sucesivas también de ladrillo pero tomadas con mortero de cal (Truñó Ruseñol, 2004). En los senos tiene un relleno estructural y el resto, hasta conseguir el plano horizontal superior, es un relleno flojo. La particularidad de esta bóveda es que no necesita cimbra auxiliar durante su construcción (Albarrán, 1885), pues el fraguado rápido del yeso de la primera hoja permite que ésta se sustente por sí mismo, sin necesidad de un soporte provisional. En el modelo se ha prescindido de los contrarrestos de la bóveda (elemento que ha de soportar los empujes horizontales que ésta transmite), y han sido sustituidos por tirantes metálicos para conseguir el equilibrio.

La misión estructural del relleno es repartir las cargas aplicadas en la plataforma hacia la bóveda resistente, confinar ésta, y servir de elemento resistente, cuando la línea de presiones, para ciertas directrices y condiciones de carga, caiga fuera de la propia bóveda (Martínez et al., 2001).

Como base de la estructura de fábrica, se ha utilizado un ladrillo hueco sencillo, o rasilla, de dimensiones 24x12x3 cm y de peso específico de 12.07 kN/m³, de modo que cada pieza no supera el valor de 11 N.

Next, a set of calculation and load hypothesis were defined, which were the base for calculating each structure, thus creating a modular pattern of 4x4, 5x5, 6x6, 7x7 and 8x8 to analyze the behavior of these structures as the interaxial distance increases.

Once the efforts and loads of each one of the former structures were identified, we went ahead with sizing their dimensions, and later on an inventory of materials, labor force and auxiliary means composing the structure was made. Next, a life cycle inventory of each material was carried out, using the Life Cycle Assessment techniques described in the following paragraphs.

2.1 Analyzed Typologies

In the study we used arris vaults with square plans, 1/5 rise-span ratio elliptic section with a layer edge of 0.06m. That is, in a 5x5 vault, at a length of 5m, a deflection of 1.67m is needed. It is a bricked or Catalan vault (Riccardo Gulli, 1995), made of several layers; the first bricked layer is put upright and uses gypsum mortar, and the successive layers are also made with bricks but uses lime mortar (Truñó Ruseñol, 2004). In the spandrels it has a structural fill and the rest, until the top horizontal plan is obtained, is a loose fill. The characteristic of this vault is that it does not need an auxiliary formwork during its construction (Albarrán, 1885), because the fast gypsum set of the first layer allows it to be self-supporting, and therefore it does not need a provisional support. The model has left out the vault's counterforts (element which supports the horizontal thrusts transmitted by the vault), and they have been replaced by metallic beams to obtain balance.

The structural function of the fill is to distribute the loads applied to the platform towards the resistant vault, to confine the latter, and to serve as resistant element when the pressure line, for certain directrices and load conditions, fall out of the vault itself (Martínez et al., 2001).

As base of the masonry structure, a simple hollow brick was used, whose dimensions were 24x12x3cm and its specific weight was 12.07kN/m³, so that each piece did not exceed the value of 11N.

Esta característica es importante por cuanto que el peso no debe superar el valor que no sea posible sostenerse simplemente por la adherencia del yeso hasta que está completada la hilada. Teniendo en cuenta que cada ladrillo se “pega” por dos caras en la primera postura, esto es una superficie de contacto de 108 cm^2 , con lo que el yeso está trabajando a un esfuerzo cortante de 0.102 N/cm^2 . La resistencia del ladrillo no es un valor determinante por cuanto en la bóveda el ladrillo trabaja a tensiones muy bajas.

Como modelo de estructura de hormigón se ha escogido un forjado reticular de 25 cm de canto, formado por nervios de hormigón armado cada 72cm, bloques de hormigón aligerado de $60 \times 20 \times 25 \text{ cm}$ y capa de compresión de 5cm de espesor. El hormigón utilizado es del tipo HA-25/B/16/I, de 25 N/mm^2 , consistencia blanda, tamaño de árido máximo de 16 mm en ambiente normal, elaborado en central (Josa, et al., 1997). La malla electrosoldada utilizada es de tamaño $20 \times 30 \text{ cm}$ y de 5mm de diámetro longitudinal y transversal, utilizando acero de tipo B 500T.

Ambos modelos se sustentan en cuatro pilares de hormigón situados en las esquinas. Dentro de la lógica constructiva, la bóveda debería estar apoyada en elementos de fábrica, pero ello impediría establecer una comparación homogénea entre ambos modelos. En la Figura 1 se puede observar una bóveda apoyada sobre pilares de hormigón armado.

This is a relevant feature, because the weight must not exceed the value which cannot support itself only by the gypsum adherence until the row is completed. If we take into account that each brick is “glued” on both sides in the first layer, this means a contact surface of 108 cm^2 , so the gypsum works at a shear stress of 0.102 N/cm^2 . The brick’s resistance is not a determinant value since the brick works at very low tensions in the vault.

As a concrete structure model, a reticulated slab of 25cm measured upright was chosen, formed by reinforced concrete ribs every 72cm, lightweight concrete blocks of $60 \times 20 \times 25 \text{ cm}$ and compression layer 5cm thick. Concrete type HA-25/B/16/I, of 25 N/mm^2 was used, soft consistency, maximum aggregate size of 16mm in normal environment, manufactured at the plant (Josa, et al., 1997). The welded wire fabric measured $20 \times 30 \text{ cm}$ with a longitudinal and transverse diameter of 5mm, using steel type B 500T.

Both models are supported by four concrete pillars located in the corners. Within the constructive logic, the vault should be supported by masonry elements, but this would not allow a homogenous comparison between both models. In Figure 1 we can see a vault supported on reinforced concrete pillars.



Figura 1. Sistema de apoyo de bóveda sobre pilares de hormigón
Figure 1. Vault system supported on concrete pillars

2.2 Hipótesis consideradas

Se han considerado dos estructuras, una de tipo abovedada y otra reticular, tomando como modelo una simulación de las situaciones reales existentes, evitando intencionadamente trabajar con modelos provenientes de programas informáticos de cálculo.

2.2 Evaluated Hypothesis

Two structures have been considered, a vaulted-type and a reticulated one; a simulation of existing real situations was taken as a model, intentionally avoiding working with models offered by calculation software.

Las estructuras de hormigón, a efectos de cálculo, están ponderadas con los coeficientes de seguridad impuestos en las diferentes normativas que le afectan, tanto de mayoración de cargas como de minoración de tensión para los materiales. Las estructuras de fábrica (bóvedas), se analizan con coeficientes de seguridad geométricos, en lugar de ponderar cargas y tensiones, por estar su punto crítico en la geometría y no en las tensiones del material.

Asimismo se ha excluido del estudio la cimentación por estar comparando dos sistemas estructurales por su sistema constructivo, independiente de su asentamiento en el terreno. Nuevamente la inclusión de la cimentación perturbaría los resultados para el objetivo pretendido, ya que introduciría otra variable como es la ubicación y características del terreno, cuestión que no interesa al caso que nos ocupa.

Para realizar el análisis de la bóveda a efectos de empuje, se ha utilizado el método de la estática gráfica de Karl Culmann (Jacobo, 2004), y las teorías de Jacques Heyman.

2.3 Análisis del ciclo de vida

El análisis de la vida de un producto es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas de la vida útil de un producto (Thormark, 2002). En el desarrollo del presente trabajo, se ha utilizado el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), aplicando las normas ISO 14040 e ISO 14044, dividiendo la vida de cada uno de los materiales (Sartori y Hestnes, 2007), que componen la estructura en cinco etapas:

- La fabricación, que incluye la extracción de las materias primas y el proceso de fabricación.
- La expedición del material hasta el punto de consumo.
- El trabajo de colocar los recursos utilizados en el proceso de construcción.
- La vida útil de los recursos utilizados
- La demolición y el reciclaje.

En el desarrollo del trabajo se han contemplado todos los impactos ambientales, sin distinguir el momento y el lugar donde se han producido, para evitar la implementación de acciones tendentes a mejorar un aspecto ambiental, empeorando otro.

Las etapas seguidas en el ACV han sido: definición de objetivos y alcance, inventario, evaluación de impactos e interpretación de resultados.

For calculation purposes, the concrete structures are weighted with the safety coefficients imposed by different standards, both of factored loads and stress reduction factor for materials. The masonry structures (vaults) are analyzed with geometrical safety coefficients, instead of weighting loads and stresses, since its critical point is in geometry and not in the material's stresses.

Likewise, the foundation has been excluded from the study, since we are comparing the constructive system of two structural systems, independently of their settling on the ground. Once again, the inclusion of the foundation would alter the results for the pretended objective, since it would introduce another variable such as the location and the characteristics of the ground, an issue which is of no interest for the purpose of our analysis.

In order to carry out the vault analysis in terms of the thrust, the method of graphical statics of Karl Culmann (Jacobo, 2004) and the theories of Jacques Heyman were used.

2.3 Life Cycle Assessment

A product's life assessment is a methodology which intends to identify, quantify and characterize the different potential environmental impacts, associated to each one of the product's useful life stages (Thormark, 2002). In order to develop the present study, the Life Cycle Assessment (LCA) was used, according to the ISO 14040 and ISO 14044 standards, dividing the life of each material (Sartori and Hestnes, 2007) forming the structure into five stages:

- The manufacture, which includes the extraction of raw materials and the manufacturing process.
- The delivery of the material to the consumption point.
- The work of putting the used resources in the construction process.
- The useful life of the used resources.
- Demolition and recycling.

The work development has envisaged all environmental impacts, without distinguishing the moment and place where they have been produced, in order to avoid implementing actions tending to improve an environmental aspect while worsening another.

The stages followed in the LCA have been: definition of objectives and scope, inventory, impact assessment and results' interpretation.

Se ha realizado un inventario del Ciclo de Vida (ICV), que cuantifica los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua (las cargas medioambientales) derivados de todos los procesos. Es decir, se ha evaluado cada producto constructivo a lo largo de su ciclo de vida, con el fin de precisar la interacción de los productos con el medio, evaluando el costo energético, las emisiones de CO₂, la generación de residuos, así como la mano de obra necesaria y el coste económico de la construcción (Cardim de Carvalho, 2001).

Para determinar la energía utilizada en la construcción y las emisiones medioambientales, se ha utilizado el banco de precios 2011 BEDEC PR/PCT del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC, 2011). En la Tabla N° 1 se han detallado los valores de energía y emisiones necesarios para la producción de los materiales, utilizados en el desarrollo de este trabajo.

A Life Cycle Inventory (LCI) has been carried out, which quantifies raw materials and energy consumptions together with the emissions to the atmosphere and all solid residues poured into the water (environmental loads) derived from all processes. In other words, each constructive product has been evaluated throughout its life cycle, with the aim of specifying the interaction of the products with the environment, thereby assessing the energy cost, CO₂ emissions, residues' generation, and the necessary labor force and economic cost of the construction (Cardim de Carvalho, 2001).

In order to determine the energy used in the construction and the environmental emissions, the price index 2011 BEDEC PR/PCT of the Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC, 2011) was used. Table 1 details the values of energy and emissions needed to produce the materials used in the development of this work.

Tabla 1. Valores energéticos y de emisiones utilizadas en el proceso de cálculo
Table 1. Energy and emission values used in the calculation process

Material	Coste energético/Energy Cost MJ/kg	Coste energético/Energy Cost kWh/kg	Emisión/Emission CO ₂ kg CO ₂ /kg	Peso específico/Specific Weight kN/m ³
Acero/Steel	35.000	9.722	2.800	78.500
Gasóleo/Gas Oil	10.100	2.806	0.003	8.900
Cemento/Cement	4.360	1.211	0.410	13.950
Cal/Lime	3.430	0.953	0.320	9.950
Ladrillo/Brick	2.321	0.645	0.180	12.070
Madera/Wood	2.100	0.583	0.060	14.600
Yeso/Gypsum	1.800	0.500	0.160	12.500
Áridos/Aggregates	0.100	0.028	0.007	15.000
Arena/Sand	0.100	0.028	0.007	15.200
Agua/Water	0.050	0.014	0.001	10.000
Escombros/Debris	-0.050	-0.014	0.000	12.500

En los productos que han sido realizados utilizando energía recuperada a partir de material o de energía que hubiera sido dispuesto como residuo (AENOR, 2006), la evaluación de la energía recuperada se ha calculado de acuerdo con la expresión 1.

$$Er = \frac{(R - E)}{(R - E) + P} \times 100 \quad (1)$$

Siendo E_r la energía neta recuperada expresada en %, P la cantidad de energía de fuentes primarias utilizada en el proceso de construcción, R la cantidad de energía resultante del proceso de recuperación de energía y E la cantidad de energía de fuentes primarias utilizada en el proceso de recuperación de energía, todas éstas expresada en MJ.

For the products that have been manufactured with energy recuperated from materials or energy that has been disposed of as a residue (AENOR, 2006), the evaluation of the recuperated energy has been calculated according to equation 1.

Being E_r the recuperated net energy expressed in %, P the amount of primary sources energy used in the construction process, R the amount of energy coming from the energy recuperation process and E the amount of energy of primary sources used in the energy recuperation process, all of them expressed in MJ.



Para determinar los precios y rendimientos de materiales y de mano de obra utilizados en el proceso de ejecución, se ha utilizado como referencia, la Base de Precios de la Construcción de Extremadura, edición 2010 (Consejería de Fomento, 2010). Para el cálculo del coste económico de la construcción se ha considerado un coste medio de 13.50 €/h para oficiales y de 12.80 €/h en el caso de ayudantes y peones.

3. Discusión y desarrollo

Se exponen a continuación los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo, en función de la energía invertida en el proceso constructivo, la emisión de CO₂, la cantidad y calidad de la mano de obra necesaria en la construcción, la tipología de los residuos generados en el proceso de embalaje y de obra, y el coste total del proceso constructivo.

3.1 Según la energía invertida en el proceso constructivo

La energía consumida en el proceso constructivo indica el esfuerzo energético necesario en la construcción de una estructura, contando la energía utilizada en la fabricación de cada uno de los materiales utilizados en el proceso constructivo (Argüello Méndez, Cuchí Burgos, 2008).

El proceso de fabricación de los materiales de construcción, así como de los productos de los que están formados, ocasiona un impacto ambiental, que tiene su origen en la extracción de los recursos naturales necesarios para su elaboración, incluyendo el proceso de fabricación y el consumo de energía, que deriva en emisiones tóxicas a la atmósfera, que resultan contaminantes, corrosivas y perjudiciales para la salud.

Se ha demostrado que la energía consumida en el proceso constructivo de las estructuras abovedadas es inferior a la necesaria para construir estructuras reticulares, como se puede observar en la Figura 2, en la que se ha representado la energía total utilizada tanto en el proceso de fabricación de materiales, como en el transporte y construcción, de una estructura reticular respecto a otra realizada mediante bóveda de arista, en función de distintas modulaciones. Esta energía ha sido calculada en función del inventario de ciclo de vida de los productos, la cantidad de materiales que conforman cada una de las estructuras y los valores energéticos expuestos en la Tabla 1.

In order to determine the prices and performances of the materials and labor force used in the execution process, the Base de Precios de la Construcción de Extremadura, Edition 2010, has been used (Consejería de Fomento, 2010). In the calculation of the construction's economic cost, an average cost of 13.50€/h for skilled workers and 12.80 €/h in the case of assistants and unskilled workers.

3. Discussion and Development

The results obtained during the work development are described below in terms of the energy invested in the constructive process, the CO₂ emission, the quantity and quality of the labor force needed in the construction, the type of residues generated in the packing process and the works, and the total cost of the constructive process.

3.1 According to the energy invested in the constructive process

The energy consumed in the constructive process indicates the energy effort needed in the construction of a structure, considering the energy used in the manufacture of each of the materials used in the constructive process (Argüello Méndez, Cuchí Burgos, 2008).

The manufacturing process of the construction materials, and of the products that form them, produces an environmental impact, whose origin is in the extraction of the natural resources needed for its elaboration, including the manufacturing process and the energy use which derives in toxic emissions into the atmosphere with contaminant, corrosive and harmful results for health.

It has been demonstrated that the energy used in the constructive process of vaulted structures is lower than the necessary one to build reticulated structures, as shown in Figure 2, which illustrates the total energy use both in the material manufacturing process and the transport and construction of a reticulated structure, in relation to another made with arris vault, considering different modulaciones. This energy has been calculated in terms of the life cycle inventory of the products, the amount of materials forming each one of the structures and the energy values shown in Table 1.

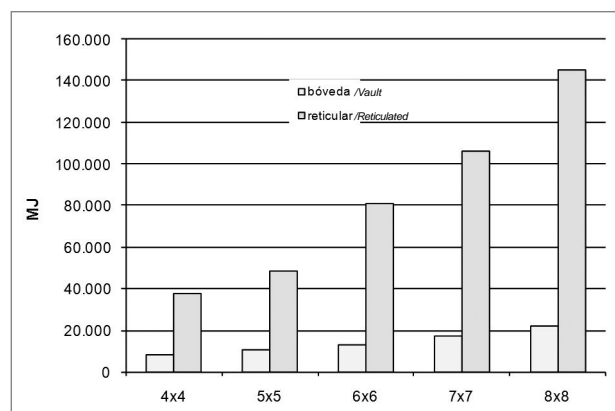


Figura 2. Energía consumida en el proceso constructivo de distintas estructuras abovedadas respecto a reticulares en función de distintos módulos constructivos

Figure 2. Energy used in the constructive process of different vaulted structures in relation to reticulated ones, considering different constructive modules

Para un módulo estructural de 5x5, el proceso de fabricación de los materiales necesarios y de construcción de una bóveda consume 10.914 MJ, mientras que una estructura reticular consumiría 48.655 MJ. Además se ha puesto de manifiesto que conforme aumenta la distancia interejes de los pilares de los forjados, la energía invertida en el proceso de construcción de la estructura abovedada disminuye proporcionalmente a la necesaria para construir una estructura reticular.

For a 5x5 structural modulus, the process of manufacturing the necessary materials and building a vault consume 10,914MJ, while a reticulated structure would consume 48,655MJ. It is also evident that, as the interaxial distance of the slab pillars increases, the energy invested in the construction process of the vaulted structure decreases proportionally to the one needed to build a reticulated structure.

3.2 Según la emisión de CO₂ del proceso constructivo

La emisión de dióxido de carbono a la atmósfera durante la fabricación y la construcción, es la variable que indica el impacto que tiene el proceso de construcción de la estructura sobre el medio ambiente, y como contribuye al aumento del Potencial de Calentamiento Global del Planeta (García Casals, 2004).

La emisión de gases a la atmósfera, medidos en kilogramos de emisiones de CO₂ equivalentes, nos indica el potencial de calentamiento global (GWP) a causa de los diversos gases emitidos durante la producción y puesta en obra de los materiales de construcción generadores de Efecto Invernadero (GEI): Dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y clorofluorocarbonos (CFC), (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

En la Figura 3 se ha representado la emisión de dióxido de carbono derivada del proceso de fabricación de materiales, de su transporte y de la construcción, de una estructura reticular respecto a otra realizada mediante bóveda de arista, en función de distintas modulaciones,

3.2 According to the CO₂ emission of the constructive process

The carbon dioxide emission to the atmosphere during the manufacturing and construction process is the variable that indicates the impact of the structure's building process on the environment, and how it contributes to increase the Planet's Global Warming Potential (García Casals, 2004).

The emission of gases into the atmosphere, measured in kilograms of equivalent CO₂ emissions, indicates the Global Warming Potential (GWP) caused by different gases emitted during the production and setting up of the construction materials which generate the greenhouse gases effect (GEI): carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), methane (CH₄), nitrogen oxides (NO_x), ozone (O₃), sulfur dioxide (SO₂) and chlorofluorocarbons (CFC), (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007).

Figure 3 illustrates the carbon dioxide emission derived from the manufacturing process of materials, their transport and construction of a reticulated structure in relation to another made with aris vault, considering different modulations,

y en base al Inventario de Ciclo de Vida generado en el desarrollo del estudio. Estas emisiones han sido calculadas en función del inventario de ciclo de vida de los productos, la cantidad de materiales que conforman cada una de las estructuras y los valores de emisiones expuestos en la Tabla 1.

and based on the Life Cycle Inventory generated during the study's development. These emissions have been calculated in terms of the product's life cycle inventory, the amount of materials forming each one of the structures and the emission values indicated in Table 1.

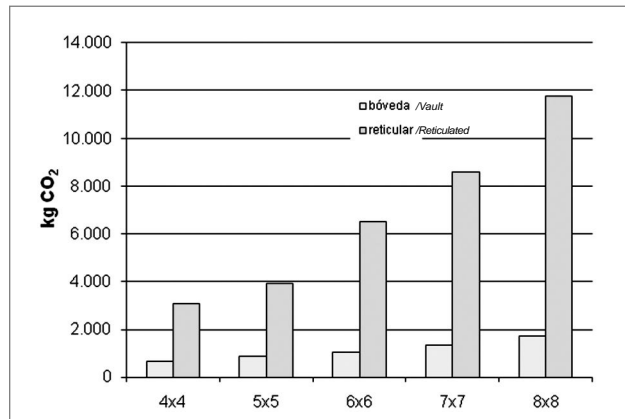


Figura 3. Emisión de CO₂ en el proceso constructivo de distintas estructuras abovedadas respecto a reticulares en función de distintos módulos constructivos

Figure 3. CO₂ emission in the constructive process of different vaulted structures versus reticulated ones considering different constructive modules

Se puede observar como la emisión de dióxido de carbono en el proceso de fabricación de los materiales, de su transporte, colocación y manipulación en obra en estructuras abovedadas es inferior a la emisión producida en la construcción de estructuras reticulares.

En el transcurso de la investigación también se han analizado las emisiones de otros gases con efecto invernadero derivado del proceso de fabricación, transporte y construcción de este tipo de estructuras, tales como son NO_x, SO_x y CO, siendo en todos los casos inferiores en la hipótesis de construcción abovedada frente a la utilización de forjado reticular.

3.3 Según la cantidad y calidad de la mano de obra

En la Figura 4 se ha representado la cantidad de horas de mano de obra utilizada, clasificada por horas de oficial y horas de ayudante, en el proceso de construcción de estructuras reticulares y abovedadas. Para calcular los rendimientos de la mano de obra, se ha utilizado la Base de Precios de la Construcción de Extremadura (Cuadrado rojo y Losada Rodríguez, 2007), descomponiendo cada unidad de obra en unidades simples en función de cada uno de los oficios que intervienen en el proceso de ejecución.

It is possible to observe how the carbon dioxide emission in the manufacturing process of the materials, their transport, arrangement and manipulation in site of vaulted structures is lower than the emission produced by the construction of reticulated structures. Throughout the research we also analyzed the emission of other gases with greenhouse effect derived from the manufacturing process, transport and construction of this type of structures, such as NO_x, SO_x and CO, and they all proved to be lower in the vaulted construction hypothesis than in the use of reticulated slabs.

3.3 According to the Amount and Quality of Labor Force

Figure 4 shows the number of labor hours used, classified by skilled worker hours and assistant hours, in the building process of reticulated and vaulted structures. In order to calculate the performances of labor force, the Base de Precios de la Construcción de Extremadura (Cuadrado Rojo and Losada Rodríguez, 2007) was used, breaking down each work unit in simple units in terms of each one of the skills involved in the execution process.

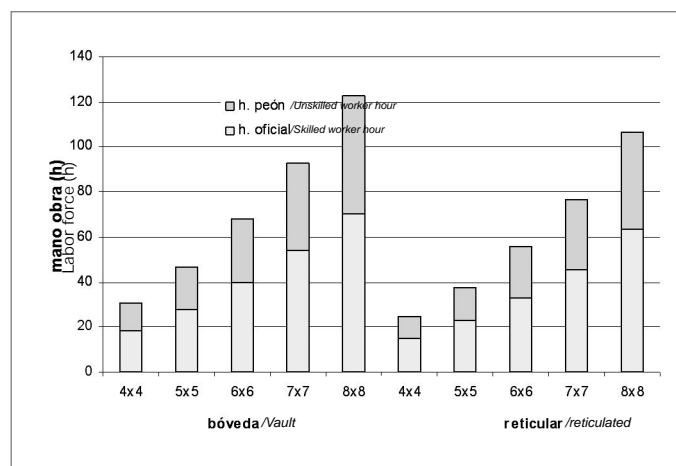


Figura 4. Mano de obra necesaria en el proceso constructivo de distintas estructuras abovedadas respecto a reticulares
Figure 4. Labor force needed in the constructive process of different vaulted structures in relation to reticulated ones

Se puede observar como la mano de obra necesaria en el proceso constructivo de las estructuras abovedadas es superior que la necesaria para construir estructuras reticulares, en todos los supuestos analizados. Además se ha evidenciado que la mano de obra necesaria para construir estructuras a base de bóvedas debe ser más especializada que la necesaria en caso de estructuras reticulares. Una mano de obra muy cualificada disminuye el tiempo de ejecución, mientras que una mano de obra sin cualificar incrementaría sustancialmente el mismo.

3.4 Según la generación de residuos derivados del proceso constructivo

En la Figura 5 se ha representado la cantidad media de residuos generados en el proceso de construcción de las estructuras objeto del análisis, expresada en kg por unidad de superficie y clasificados en función de su procedencia en residuos provenientes de los embalajes de los distintos materiales necesarios para la construcción, tales como sacos de papel, polietileno, plásticos en general y residuos derivados del proceso constructivo, fundamentalmente escombros y restos de material inerte. El cálculo de los residuos se ha realizado en función del inventario de ciclo de vida de los productos.

It can be seen that in all analyzed assumptions the labor force needed in the constructive process of vaulted structures is higher than the one needed to build reticulated structures. It is also evident that the labor force needed to build vaulted structures has to be more qualified than for reticulated structures. A very qualified labor force reduces the execution time, while an unskilled labor force substantially increases it.

3.4 According to the Generation of Residues Derived from the Constructive Process

Figure 5 illustrates the average amount of residues generated in the construction process of the analyzed structures, expressed in kg per area unit, and classified in terms of their origin, in residues coming from the packing of different materials needed for building, such as paper bags, polyethylene, plastics in general, and residues derived from the constructive process, mainly debris and inert material rests. The residues calculation was made considering the product's life cycle inventory.

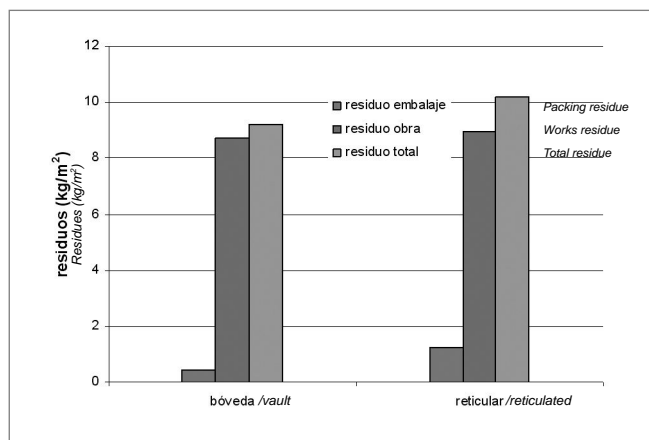


Figura 5. Cantidad media de residuos generados en estructura abovedas frente a reticulares
 Figure 5. Average amount of residues generated in vaulted structures vs. reticulated ones

Se puede observar como la generación de residuos de las estructuras abovedadas es inferior al resultante de construir estructuras reticulares, fundamentalmente en lo referente a residuos derivados del embalaje, que son 177.78% inferiores en las estructuras abovedadas. (Ruiz Larrea, et al., 2008). Además, los residuos derivados del proceso constructivo son inferiores en las estructuras abovedadas, debido a que una parte de los escombros reciclados provenientes de materiales cerámicos, al ser materiales inertes, se pueden utilizar como relleno de los senos de las estructuras abovedadas.

La recogida selectiva de residuos es imprescindible tanto para facilitar su valorización como para mejorar su gestión en el vertedero (Álvarez Ude Cotera, 2003). Los residuos, una vez clasificados, pueden enviarse a gestores especializados en el reciclaje.

3.5 Según el coste económico de la construcción

El coste de ejecución de las estructuras, es la variable que nos indica la viabilidad económica de su utilización (Alfonso, 2003). En la Figura 6 se ha representado el coste del proceso de construcción (PEM), incluyendo la mano de obra necesaria para su ejecución, el coste de los materiales y de los medios auxiliares utilizados, de distintas estructuras abovedadas comparándolas con estructuras reticulares en función de su modulación.

It can be observed how the generation of residues in vaulted structures is lower than for the construction of reticulated structures, mainly concerning the residues derived from packing, which are 177.78% lower than in the vaulted structures (Ruiz Larrea et al., 2008). Additionally, the residues derived from the constructive process are lower in the vaulted structures since part of the recycled debris coming from ceramic materials can be used for filling the spandrels of the vaulted structures, because they are inert materials.

The selective collection of residues is essential both for facilitating its valorization and to improve their handling in the dumping place (Álvarez Ude Cotera, 2003). Once classified, the residues can be sent to recycling specialized managers.

3.5 According to the construction's economic cost

The structures' execution cost is the variable indicating the economical feasibility of its utilization (Alfonso, 2003). Figure 6 illustrates the cost of the construction process (CSU), including the labor force needed for the execution, the cost of the materials and the auxiliary means used for different vaulted structures, comparing them with reticulated structures considering their modulation.

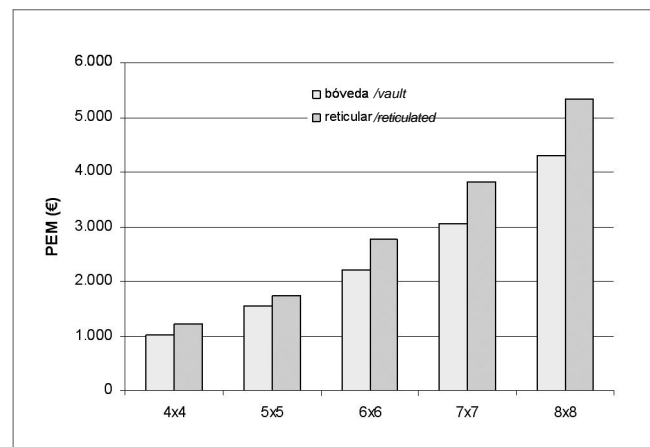


Figura 6. Precio de ejecución material de las estructuras abovedadas respecto a forjados reticulares
Figure 6. Material execution price of the vaulted structures in relation to reticulated slabs

Se puede observar como el coste de construcción de las estructuras abovedadas es inferior al calculado para construir estructuras reticuladas. Sin embargo, como se aprecia en la Figura 4, es necesaria más mano de obra en las bóvedas que en los forjados reticulares. El inferior precio de construcción de la bóveda, es consecuencia del menor precio de los materiales utilizados en su construcción, cal, yeso y mampostería frente al cemento y el acero. Respecto al coste de ejecución, es el valor correspondiente a España, aunque obviamente este dato es variable según el lugar donde se ejecute la estructura, básicamente por la incidencia del coste de la mano de obra.

4. Conclusiones

Aunque funcionalmente ambas estructuras son equivalentes, en lo referente a su capacidad portante, en términos cuantitativos no son homogéneas en su balance medioambiental. Para evidenciar los resultados de la investigación, se ha representado en la Figura 7 las variables analizadas en el desarrollo de este estudio: residuos generados, emisiones medioambientales, mano de obra necesaria, coste de ejecución, energía invertida en el proceso de fabricación de los materiales y en el proceso constructivo y nivel de seguridad en la fase de ejecución de una estructura reticular frente a otra abovedada con una modulación de 6x6.

We may observe that the construction cost of the vaulted structures is lower than the one calculated to build reticulated structures. Nevertheless, as shown in Figure 4, more labor force is needed for vaults than for reticulated slabs. The vault's lower construction price is a result of the lower price of the materials used in its construction: lime, gypsum and masonry versus cement and steel. In relation to the execution cost, the value corresponds to Spain; naturally, this datum may vary according to the execution place of the structure, basically due to the influence of the labor cost.

4. Conclusions

Although from a functional point of view both structures are equivalent, in relation to their bearing capacity, they are not homogenous in their environmental balance in quantitative terms. In order to demonstrate the results of the research, Figure 7 illustrates the variables analyzed in the development of this study: generated residues, environmental emissions, necessary labor force, execution cost, energy invested in the manufacturing process of the materials and in the constructive process, and the safety level in the execution stage of a reticulated structure versus a vaulted one, with a 6x6 modulation.

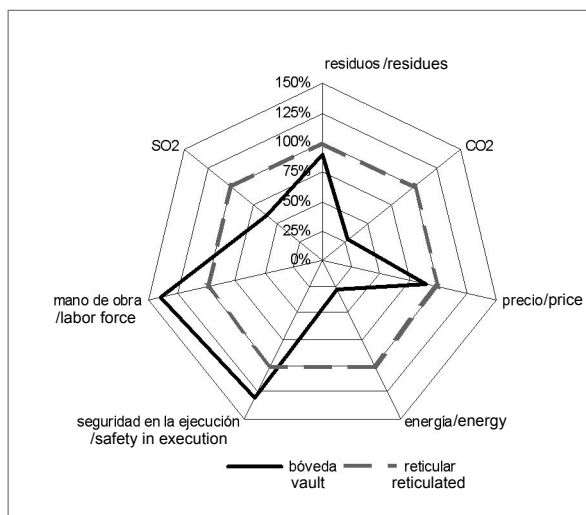


Figura 7. Comparativa entre una estructura abovedada y otra reticular de 6x6, en función de las variables analizadas en el estudio
 Figure 7. Comparison between a vaulted and a reticular structure of 6x6, based on the variables analyzed in the study

Como refleja la Figura 7, para la construcción de estructura tipo bóveda, es necesario más cantidad de mano de obra y en lo que respecta a seguridad en la fase de construcción, al construirse la bóveda sin elementos de cimbra, se incrementa el riesgo de accidentes en la construcción, por lo que se deben multiplicar las medidas de seguridad y vigilancia en esta fase, sobre todo hasta la finalización de la hoja inferior de la bóveda. En contraposición, los materiales que conforman la bóveda consumen menos energía en su proceso de fabricación y montaje en obra, con una menor emisión de gases con efecto invernadero y de efecto acidificante a la atmósfera.

Para evaluar los resultados totales sería preciso trasladar todas las variables a una misma unidad, traduciendo por ejemplo a euros el coste de energía consumido, el coste de mano de obra, el coste de emisiones de CO₂, el coste de residuos, el coste de aislamiento térmico y acústico. El resultado de esta operación será diferente según el país y el lugar donde se ejecute la obra.

Con respecto a los efectos medioambientales se ha demostrado que la construcción abovedada satisface con creces las exigencias actuales en cuanto a sostenibilidad, emisiones de CO₂ y producción de residuos. No todos los países tienen las mismas reglamentaciones en esta materia y en algunos está más penalizado que en otros los efectos negativos sobre el medio ambiente.

En relación a la mano de obra, la especialización es una variable determinante en el costo de las estructuras de fábrica. Una mano de obra muy cualificada disminuye el tiempo de ejecución, mientras que una mano de obra ignorante no será capaz nunca de concluir el trabajo.

As shown in Figure 7, the construction of vaulted-type structures needs more labor force; and regarding safety in the execution stage, the accident risk increases because the vault is built without formwork elements. Therefore, safety measures and monitoring have to be multiplied in this stage, especially until finishing the vault's lower layer. On the other hand, the materials forming the vault consume less energy in their manufacturing process and assembly in site, with less emission of gases with greenhouse and acidifying effect into the atmosphere.

In order to assess the total results, it would be necessary to transfer all variables to a same unit, expressing for example in euros, the consumed energy cost, labor cost, CO₂ emission cost, residues cost, and the cost of the thermal and acoustic isolation. The result of this operation will differ according to the country and place where the works are executed.

Concerning the environmental effects, it has been demonstrated that the vaulted construction fully complies the current requirements in terms of sustainability, CO₂ emissions and residues' production. Not all countries have the same regulations in this matter, and some of them penalize the negative effects on the environment more than others.

In relation to the labor force, qualification is a determinant variable in the cost of masonry structures. A very skilled labor force reduces the execution time, while an unskilled labor force shall never be capable of finishing the work.

Es obvio que la mayor mano de obra puede ser una ventaja en escenarios de tasa de paro elevada, en periodos de recesión económica y en países cuya mano de obra sea económica.

En lo concerniente al aislamiento, se ha detectado que las bóvedas, con senos rellenos, representan un gran aislamiento térmico frente a otros sistemas estructurales por la cantidad de masa que representan. Además, el aislamiento térmico aumenta en función del número de hojas por las que esté constituida y del espesor de éstas. Igualmente, las bóvedas representan un gran aislamiento acústico frente a otros sistemas estructurales, por dos razones. En primer lugar, porque la bóveda está compuesta por elementos discontinuos que dificultan la propagación de las ondas sonoras, y especialmente, las producidas por impacto. En segundo lugar, por la cantidad de masa, mayor que cualquier otro sistema estructural.

Por todo ello se puede concluir que la utilización de las bóvedas, como estructuras de fábricas, es aconsejable siempre que no se trate de edificios de gran altura. Incluso que esta técnica constructiva puede convivir con la alta tecnología propia de la sociedad actual, dando como resultado un producto de altas prestaciones económicas, funcionales y energéticas y que es posible sustituir los forjados convencionales por otros a base de bóvedas.

Construir edificios durables, entendido no sólo como un problema técnico sino también como un parámetro de diseño que debe evitar su obsolescencia funcional, es decisivo en el impacto ambiental de la construcción. En el desarrollo de la investigación se ha detectado que desde la perspectiva de sostenibilidad ambiental y su coste de ejecución, es más interesante la utilización de bóvedas cuánto mayores luces se necesite salvar.

En la fase de deconstrucción, el volumen de residuos generados por una estructura abovedada es superior al volumen de residuos que genera una realizada con hormigón armado, debido a que las primeras ocupan un mayor volumen (CEDEX, 2010). Sin embargo, los escombros reciclados provenientes de materiales cerámicos tiene una mayor posibilidad de utilización en obras públicas y en edificación (Cuchí y Sagraera, 2007), ya que entre otros usos, puede utilizarse de nuevo como relleno de los senos, pues se considera material inerte.

It is evident that a greater labor force can be an advantage in a high unemployment rate scenario, economic recession periods, and in countries with cheap labor force.

As for isolation, it has been detected that vaults with filled spandrels offer a great thermal isolation in comparison to other structural systems due to the amount of mass they represent. Furthermore, the thermal isolation increases in terms of the number of layers and their thickness. Likewise, vaults offer a great acoustic isolation in comparison to other structural systems for two reasons. First, because the vault is formed by discontinuous elements that difficult the sound waves' dissemination, especially, those produced by impact. Second, due to the mass amount that is greater than in any other structural system.

For all these reasons, we may conclude that the use of vaults, as masonry structures, is advisable as long as we are not dealing with very high buildings. We can even state that this constructive technique may coexist with the cutting-edge technology of today's society, resulting in a product with high economic, functional and energy performances, and that it is possible to replace the conventional slabs by others based on vaults.

To build durable buildings, not only in terms of a technical problem but also of a design parameter that has to avoid its functional obsolescence, is a crucial matter in the construction's environmental impact. During the development of the research we detected that, from the perspective of the environmental sustainability and its execution cost, the use of vaults is more interesting when it comes to cover larger spans.

In the deconstruction stage, the residues' volume generated by a vaulted structure is greater than the one generated by a structure made of reinforced concrete, since the former fill a greater volume (CEDEX, 2010). However, recycled debris derived from ceramic materials have more use possibilities in public works and building (Cuchí and Sagraera, 2007), since, among others, it can be reused as fill for spandrels, because it is considered inert material.

5. Discusión

Las estructuras de fábrica son recomendables en edificios de poca altura, donde es fácil conducir los empujes hacia el suelo. Sería impensable su uso para construcciones como rascacielos. En esos ámbitos no pueden competir con las estructuras de hormigón, o incluso de acero, pero ello no las hace inservibles.

En ciertas condiciones su utilización es aconsejable, no sólo por cuestiones medioambientales sino incluso por razones estrictamente económicas, como por ejemplo en aquellos países en vías de desarrollo donde es abundante la mano de obra y al mismo tiempo hay escasez de materiales de producción industrial como el cemento o el acero.

Ninguna sociedad puede permitirse el lujo de tirar por la borda un conocimiento adquirido argumentando simplemente su falta de utilidad. Las tecnologías del hierro y del hormigón no están al alcance de todos los habitantes del planeta, y quienes las disfrutamos no podemos ufanarnos de no poder perderlas en un futuro que se nos presenta cuando menos incierto. La literatura y la cinematografía de ficción nos presentan como uno de los futuros posibles es el retroceso cultural y tecnológico. La crisis del petróleo obligó a la intensificación del consumo de materiales como el carbón y a desempolvar viejas tecnologías como los molinos de viento para aprovechar otras fuentes de energía como la eólica. Podría suceder que por insospechados motivos, que en otros tiempos tuviéramos que recurrir una vez más a las construcciones abovedadas.

En la actualidad la utilización de la bóveda se limita casi exclusivamente a aspectos ornamentales, eludiendo intencionadamente su carácter estructural. Para evitar su posición de desventaja en el mercado, respecto a las estructuras de hormigón, se debería disponer de una normativa de similares características a las que ya tienen materiales como el hormigón y el acero. Es evidente que las estructuras abovedadas no están contempladas en el cuerpo normativo de aplicación en la edificación, ni para obra nueva ni para obra de rehabilitación, por lo que desde un punto de vista legal se encuentran en terrenos de nadie, en la "inexistencia". Sería deseable que se dictaran unas normas mínimas que permitieran su utilización con un mínimo de garantía tanto para constructores como para usuarios. Por ejemplo en Europa existen "eurocódigos" para el hormigón, el acero, la madera, etc., pero no existe ninguno de aplicación a las obras de fábrica, a las estructuras abovedadas.

5. Discussion

Masonry structures are recommendable in low buildings, where thrusts can be easily conducted to the ground. Their use in skyscraper-type buildings is unthinkable. In this field they cannot compete with concrete structures, or even steel ones, but this does not turn them useless.

Their use is advisable under certain conditions, not only for environmental issues, but also for strictly economical reasons, for example in the developing countries having a large number of labor force, and at the same time a shortage of industrial production materials such as cement or steel.

No society can afford to throw away an acquired knowledge by simply arguing its usefulness. Iron and concrete technologies are not within the reach of all the planet's inhabitants, and those of us who enjoy them cannot boast of not losing them in a future which is at least uncertain. Fiction literature and cinema present us a possible future with cultural and technological setback. The oil crisis made it necessary to intensify the consumption of materials such as charcoal, and to remove the dust from old technologies like wind mills in order to take advantage of other energy sources such as the aeolic. It is possible that in the future, for unsuspected reasons, we may have to resort once more to the vaulted constructions.

Currently, the use of vaults is almost exclusively limited to ornamental aspects, intentionally eluding its structural character. In order to avoid its disadvantage position in the market in relation to the concrete structures, we should have a standard of similar characteristics to that available for materials such as concrete and steel. It is evident that vaulted structures are not included in the regulatory framework applied to building, neither new works nor reconditioning works; thus, from a legal perspective, they are in no man's land, they do not exist. It would be advisable to issue certain minimum standards that would allow their use offering a minimum guarantee both for constructors and users. For example, in Europe there are "Eurocodes" for concrete, steel, wood, etc., but there is not any that can be applied to masonry works, to vaulted structures.

6. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Centro Universitario de Mérida y a la Escuela Politécnica de Cáceres, centros adscritos a la Universidad de Extremadura (España), por los medios aportados en el desarrollo de este estudio.

6. Acknowledgements

The authors wish to express their acknowledgement to the Centro Universitario de Mérida and the Escuela Politécnica de Cáceres, which attached to the University of Extremadura (Spain), for their contributions to the development of this study.

7. Referencias / References

- AENOR (2006), Manual de Gestión Ambiental. Asociación Española de Normalización y Certificación.
- Albarrán J. (1885), Bóvedas de ladrillo que se ejecuta sin cimbra. Madrid: Imprenta del Memorial de Ingenieros.
- Alfonso C. (2003), La vivienda del siglo XXI: edificación sostenible. *Ambienta: Revista del Ministerio de Medio Ambiente*, nº 23, pp. 22-28.
- Álvarez Ude Cotera L. (2003), «Edificación y desarrollo sostenible. GBC: un método para la evaluación», *Informes de la Construcción*, Vol. 55, nº 486, pp. 63-69.
- Argüello Méndez T., Cuchí Burgos A. (2008), «Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10x10 con Techo-Chiapas del CYTED». *Informes de la Construcción* Vol. 60, 509, pp. 25-34.
- CEDEX (2010), «Residuos de construcción y demolición». Centro de Estudios y Experimentación de Obra Pública. Ficha Técnica 4.1.
- CTE (2007), Código Técnico de la Edificación de España, Real Decreto 137/2007, de 19 de octubre.
- Cardim de Carvalho A. (2001), «Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento». Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña
- Consejería de Fomento (2010), Junta de Extremadura. Base de Precios de la Construcción. Mérida.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), «The Fourth Assessment Report». Organización Meteorológica Mundial y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Cuadrado Rojo J. y Losada Rodríguez R. (2007), Propuesta metodológica de evaluación de la sostenibilidad en la edificación industrial. *Dyna Ingeniería e Industria*. Vol. 82-3, pp.53-58.
- Cuchí A., Sagrera A. (2007), «Reutilización y reciclaje de los residuos del sector de la construcción». *Ambienta: Revista del Ministerio de Medio Ambiente*, nº 66, pp.59-68.
- Di Cristiano Crucianelli L. et al. (2000), Bóvedas tabicadas: L'applicazione di una tecnica costruttiva della tradizione per il recupero strutturale delle volte in folio portanti. Tesis Firenze.
- Fortea Luna M. y López Bernal V. (1998), Bóvedas extremeñas. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista. Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura.
- Fortea Luna M. y López Bernal V. (2001) Bóvedas de ladrillo. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista. Editorial de los Oficios SL.
- García Casals X. (2004), «Análisis energético y de ciclo de vida de una vivienda bioclimática en Sitges». IIT-04-0651.
- Heyman J. (1995), Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos. Madrid. Instituto Juan de Herrera.
- Huerta S. (2004), Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- ITeC (2011), Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. Banco BEDEC. Barcelona.
- Jacobo G.J. (2004), El diseño estructural por medio de los métodos gráficos. Universidad Nacional del Nordeste.
- Josa A., Aguado A. y Gettu R. (1997), «Evaluación ambiental de productos de la construcción derivados del cemento» *CIC Información* nº 299, pp.30-35.
- León González J., Corres Peiretti H. y Espejo Niño S. (2007), Obras de fábrica 1. Sostenibilidad e Ingeniería. V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil, Sevilla.
- López L. (2008), Estudio comparativo de tipologías de forjados analizando su coste económico, social y ambiental. Tesis de Licenciatura.
- López F., Cuadros F., Segador C., Ruiz A., García Sanz Calcedo J. et al. (2011), «El edificio PETER. Un ejemplo de integración de las energías renovables en la edificación». *Dyna Ingeniería e Industria*. Vol. 86-2, pp. 212-221.



- Martínez J.L., Martín Caro J.A. y León, J. (2001), *Caracterización del comportamiento mecánico de la obra de fábrica*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ministerio de Economía (2003), *“Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España 2004-2012 en el sector de la edificación”*.
- Moya Blanco L. (1993), *Bóvedas Tabicadas*. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid. Madrid.
- Riccardo Gulli, G. M. (1995), *Bóvedas tabicadas*. Architettura e Costruzione. CDP Editrice- EdilStampa, collana il modo di costruire.
- Rodríguez Galván, C.A. (2010), *The sustainability in the architecture: Analysis on the CO2 emission*. (2010).
- Sartori I., Hestnes A.G. (2007), *“Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article”*. Energy and Buildings. Vol. 39-3, pp. 249-257.
- Thormark C. (2002), *“A low energy building in a life cycle its embodied energy, energy need for operation and recycling potential”*. Building and Environment. Vol. 37-4, pp. 429-435.
- Ruiz Larrea C., Prieto E. y Gómez, A. (2008), *“Arquitectura, industria, sostenibilidad”*. Informes de la Construcción, Vol 60. Nº 512 pp. 35-45.
- Truñó Ruseñol Á. (2004), *Construcción de bóvedas tabicadas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.