

Avaliação do Impacte Ambiental de duas Soluções Estruturais Diferentes Associado à Construção de uma Habitação Unifamiliar

António Murta*, Carlos Teixeira*, Humberto Varum**, Isabel Bentes* e Jorge Pinto*

* ECT, Departamento de Engenharias

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD)

Quinta de Prados. 5001-801 – Vila Real

Telf: +351 259 350 356; fax: +351 259 350 356; e-mail: tiago@utad.pt

** Departamento de Engenharia Civil

Universidade de Aveiro (UA)

Campus Universitário de Santiago. 3810-193 – Aveiro

Telf: +351 234 370 049; fax: +351 234 370 094; e-mail: hvarum@ua.pt

Resumo — Em Portugal, a aplicação nas estruturas de materiais naturais ainda corresponde apenas a solução construtiva pontual. Neste contexto, foram estudadas duas soluções estruturais para uma habitação unifamiliar sendo uma de betão armado, denominada aqui por solução tradicional, e outra de alvenaria de adobe e pavimentos de madeira, denominada por solução sustentável. Avaliou-se o impacto ambiental associado à produção e ao transporte dos materiais para ambas as soluções estudadas e concluiu-se, como era espectável, que o impacte ambiental associado a solução sustentável é significativamente menor.

1. Introdução

Cerca de metade da população mundial, aproximadamente 3 biliões de pessoas em seis continentes, habitam ou trabalham em edifícios construídos em terra [1]. Em alguns países com menores recursos económicos a construção em terra poderá representar mais de metade da totalidade das construções existentes [2]. A construção de terra surge em muitas construções classificadas como património da Humanidade e que é elucidativo da diversidade cultural dos povos e demonstrativo da sua versatilidade em termos de aplicação [3]. São exemplos de construções antigas de terra, a Muralha da China (2000 A.C.) [4] e a cidade de Arge Bam no Irão (500 A.C.) [5]. O legado de construção em terra que chegou aos nossos dias demonstra que este tipo de construção pode apresentar uma grande durabilidade. Por sua vez, construções modernas de terra crua tais como O Adobe Repository for Buddha Statue (2001 D.C.) e o Desert Cultural Centre - Canada (2006 D.C.) [6] revelam que a terra como material natural pode ser usada na construção permitindo realizar construções bastante arrojadas.

Os materiais e elementos de construção à base de terra são sustentáveis, por um lado porque a terra é natural, reciclável e abundante em qualquer local e por outro lado porque as técnicas utilizadas para o fabrico destes materiais e elementos construtivos são normalmente

simples, requerem uma pequena quantidade de energia e emitem uma quantidade inexpressiva de gases nocivos para a atmosfera.

A comunidade científica tem intensificado o interesse no desenvolvido de estudos focados na temática da construção de terra, como é o caso da *quincha metálica* [7]. A *quincha metálica* não é mais do que uma versão moderna do tabique, em que a estrutura interna de madeira é substituída por uma grelha metálica e o enchimento é realizado com terra crua. Conseguem-se assim recuperar e adaptar uma técnica construtiva antiga às exigências actuais, melhorando o comportamento dos elementos estruturais. As principais técnicas construtivas que foram usadas em Portugal recorrendo à terra crua foram a taipa, o adobe e o tabique. Estas técnicas caíram em desuso aquando do aparecimento do betão armado e da alvenaria de tijolo cerâmico.

A obtenção dos materiais correntes na construção actual em Portugal requerem bastante energia durante as várias fases (extração, transporte, transformação, aplicação, demolição e eliminação ou reciclagem), associada à libertação de gases poluentes para a atmosfera em quantidades significativas.

Com este trabalho pretende-se estudar a viabilidade de uma solução construtiva sustentável, aliando a aplicação de materiais naturais, de fácil obtenção perto do local de construção, a métodos construtivos que requerem pouca energia na sua aplicação e, implicitamente, um baixo teor de emissão de gases poluentes para a atmosfera. Neste sentido estuda-se a aplicação de adobes de terra crua para a construção de habitações unifamiliares correntes.

Foi definida uma tipologia corrente de habitação unifamiliar para a qual foram estudadas paralelamente duas soluções estruturais, uma solução tradicional e uma solução sustentável. A solução tradicional é do tipo pilar-viga de betão armado com lajes aligeiradas de vigotas pré-esforçadas nos pavimentos e também lajes maciças em certos elementos como varandas e escadas e, alvenarias de tijolo cerâmico nas paredes divisórias e exteriores. A solução sustentável é definida por paredes resistentes de

adobe e pavimentos e escadas de madeira. Para cada uma destas duas soluções foi quantificado o consumo energético e a emissão de gases poluentes para a atmosfera, e por comparação conclui-se que a solução estrutural sustentável estudada é largamente vantajosa em termos económicos e ambientais.

2. Descrição do Edifício Estudado

O edifício estudado é idealizado como localizado na cidade da Figueira da Foz. A implantação do edifício é assumida em zona urbana rodeado de edifícios de pequeno porte, a uma altitude de 100.00 m.

Neste estudo a tipologia assumida é considerada como de grande procura no mercado português (cerca de 57%) [8], para o alojamento familiar clássico. Este tipo de habitação é adequado a um agregado familiar composto por 3 a 4 pessoas. Considerou-se deste modo uma tipologia T3 [8]. O edifício de habitação unifamiliar é muito simples em termos de arquitectura, volumetria e distribuição de espaços, (ver Figuras 1 a 4). Os espaços foram distribuídos por dois pisos, dedicando a utilização do piso térreo (piso 0) essencialmente a funções do tipo social e a utilização do piso superior (piso 1) essencialmente ao uso privado. As áreas brutas de construção dos pisos 0 e 1 são de 285.00 m² e 106.50 m², respectivamente.

A ligação entre pisos é efectuada por uma escada que liga o hall de entrada no piso 0 ao hall de distribuição no piso 1. A cobertura do alpendre é inclinada de apenas uma água com revestimento em telha cerâmica e a cobertura do piso 1 é horizontal (terraço não acessível), com revestimento de terra vegetal.

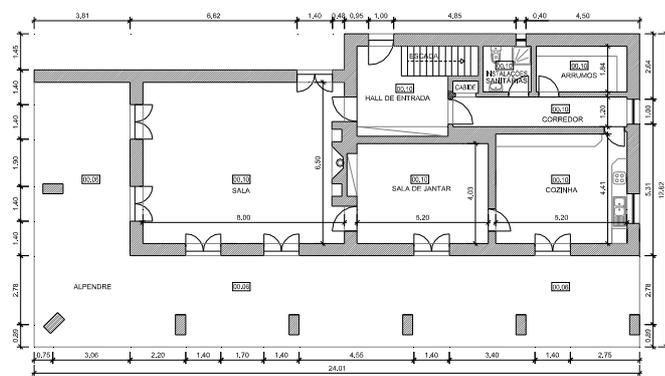


Fig .1. Arquitectura - Planta do Piso 0

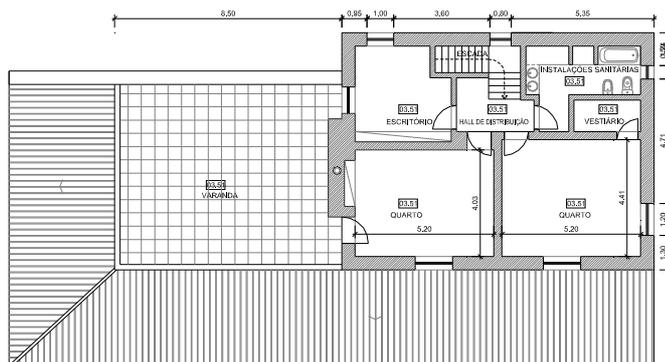


Fig .2. Arquitectura - Planta do Piso 1

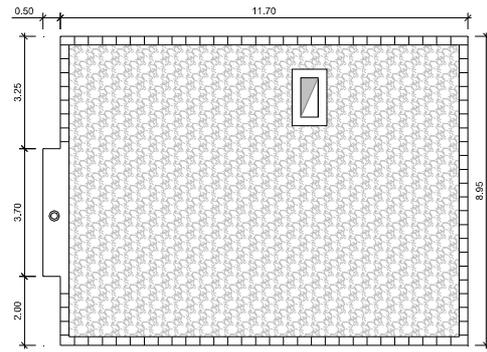


Fig .3. Arquitectura - Planta da Cobertura

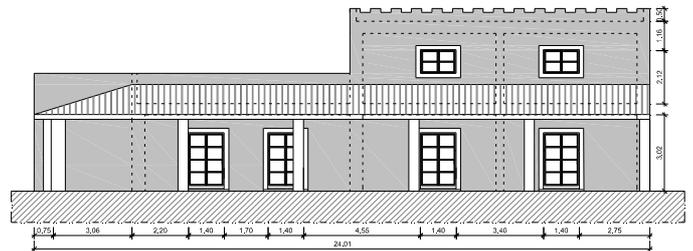


Fig .4. Arquitectura – Alçado Oeste

3. Procedimentos no Dimensionamento e Verificação da Segurança

Para o dimensionamento da solução estrutural tradicional em betão armado, utilizaram-se programas de cálculo automático comerciais. O programa de cálculo utilizado permite efectuar uma análise dinâmica modal, com avaliação prévia dos vários modos de vibração e determinação da resposta da estrutura considerando a acção sísmica através de espectros de resposta. A quantificação da acção do vento é feita de modo automático pelo programa de cálculo após indicação da zona e da rugosidade associada ao local de implantação do edifício, bem como das dimensões do edifício em planta. Foram elaboradas algumas folhas de cálculo em Excel para a verificação e análise dos resultados obtidos através do programa de cálculo automático. Estas folhas de cálculo foram também utilizadas para o dimensionamento de alguns elementos estruturais isolados, tal como vãos de escada.

Para o dimensionamento da solução sustentável foram desenvolvidas folhas de cálculo em Excel para o dimensionamento e verificação da segurança dos elementos de alvenarias de adobe, com base ao disposto na regulamentação [10] e [9]. Para o dimensionamento dos elementos estruturais de madeira (pavimentos e escadas) recorreu-se ao disposto no Eurocódigo 5, EC5 [11] e elaboraram-se também folhas de cálculo específicas, em Excel, para sistematização dos cálculos.

4. Solução Tradicional

A. Considerações Gerais

Para o edifício em estudo, e de acordo com o REBAP [12], foi considerado um betão do tipo C25/30 em todos os elementos estruturais (sapatas, pilares, vigas, escadas e lajes). O aço considerado nas armaduras correntes foi o aço S400NR de acordo com o REBAP [12]. As paredes exteriores serão duplas em alvenaria de tijolo cerâmico e as paredes interiores são constituídas panos simples de alvenaria de tijolo cerâmico, ambas argamassadas nas juntas e rebocadas.

B. Análise Estrutural

Para a análise estrutural do edifício foi necessário quantificar inicialmente as acções a considerar e estimar os seus efeitos nos elementos estruturais. A acção permanente considerada corresponde ao peso próprio dos materiais (estruturais e não estruturais) e como acções variáveis foram consideradas a sobrecarga, o vento e o sismo. Para o peso próprio dos elementos estruturais consideraram-se os pesos específicos de referência. Para o revestimento dos pisos e da cobertura considerou-se 2.00 kN/m^2 e 3.00 kN/m^2 , respectivamente.

Para as sobrecargas de utilização, e segundo o descrito em [10] considerou-se 2.00 kN/m^2 para as zonas habitáveis, 1.00 kN/m^2 para os terraços não acessíveis e 3.00 kN/m^2 para zonas de acesso. Para a acção do vento, e segundo [10], considerou-se que o edifício está localizado na zona B e uma rugosidade do tipo II. Para a acção sísmica, e segundo [10], considerou-se zona sísmica C (coeficiente de sismicidade de 0.50), terreno tipo II, coeficiente de amortecimento de 5% e coeficiente de comportamento de 2.0. Para a capacidade resistente dos solos de fundação considerou-se 200 kPa.

Após a quantificação das acções, procedeu-se às verificações da segurança da estrutura. Para o efeito, todas as secções dos elementos estruturais foram dimensionadas de forma a verificar os estados últimos de resistência e os estados limites de utilização, adoptando-se as disposições preconizadas no REBAP [12].

Os pavimentos dos pisos serão maioritariamente executados com lajes aligeiradas de vigotas pré-esforçadas. Estes pavimentos têm um funcionamento estrutural unidireccional, resistindo essencialmente a momentos flectores positivos. O apoio destes pavimentos faz-se directamente em vigas.

Pelo reduzido esforço axial nas vigas, a armadura longitudinal é calculada para a flexão simples e os estribos associados ao esforço transversal. Por sua vez, os pilares foram dimensionados tendo em conta que estão sujeitos à flexão desviada composta e considerando os efeitos de segunda ordem.

Para a fundação dos pilares previu-se a execução de sapatas isoladas.

Após o dimensionamento da solução estrutural tradicional adoptada para o edifício em estudo obteve-se como resultado a estrutura representada nas Figuras de 5 a 7. Com base nos resultados do dimensionamento realizou-se

a medição de quantidades de todos os materiais, que se resume na Tabela II (3ª coluna).

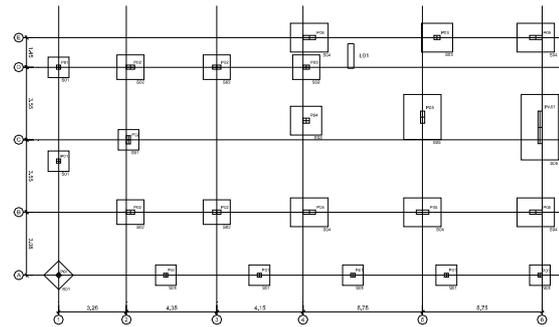


Fig .5. Planta de Fundações

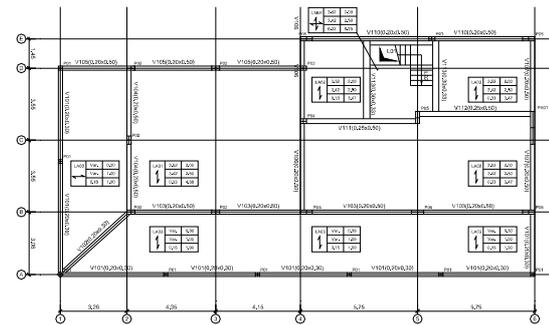


Fig .6. Planta Estrutural do Piso 1

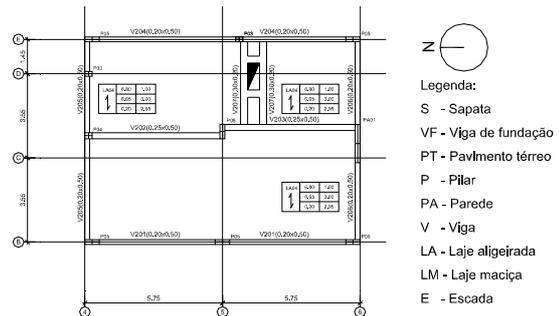


Fig .7. Planta Estrutural da Cobertura

5. Solução Sustentável

A. Considerações Gerais

Para a solução estrutural sustentável, procedeu-se inicialmente ao pré-dimensionamento dos elementos estruturais considerando as dimensões mínimas admissíveis para todos estes elementos, de acordo com o preconizado no EC6 [9] e EC5 [11]. Posteriormente, dimensionaram-se todos estes elementos utilizando folhas de cálculo em Excel especialmente desenvolvidas para o efeito.

As paredes resistentes são de alvenaria de adobe estabilizado com uma resistência à compressão de 4.0 MPa e juntas com argamassa de assentamento da classe M5 (5.0 MPa), de acordo com o EC6 [9].

Para o pavimento do piso 1, para a cobertura e para as escadas foram consideradas vigas e soalho de madeira de pinho bravo (*pinus pinaster*), mais concretamente da classe E, de acordo com o EC5 [11].

A fundação adoptada para as paredes resistentes de adobe é do tipo lintel de fundação de pedra de calcário duro. Optou-se por este material por ser natural e abundante na região de localização do edifício.

B. Análise Estrutural

A análise estrutural desenvolvida para solução sustentável estudada seguiu os princípios e os procedimentos referidos anteriormente para a solução tradicional em betão armado. Para o peso específico dos blocos de terra crua foi considerado 18.00 kN/m^3 , para a madeira 5.80 kN/m^3 . As restantes acções consideradas são análogas às definidas na secção anterior para a solução tradicional.

Os pavimentos de madeira (soalho e vigas) foram dimensionados à flexão simples e as vigas ainda ao esforço transverso. Para tal, foi desenvolvida e utilizada uma folha de cálculo em Excel com base no prescrito no EC5 [11]. O apoio destes pavimentos faz-se directamente nas paredes resistentes de adobe.

Por sua vez, as paredes de adobe foram dimensionadas tendo em conta o especificado no REBAP [10] e no EC6 [9] e, recorrendo também a uma folha de cálculo em Excel desenvolvida para o efeito. Pelo facto de não se dispor de um programa de cálculo automático para o dimensionamento de alvenarias e de estruturas de madeira, limitou este dimensionamento a uma análise 2D embora se reconheça que uma análise estrutural 3D na avaliação dos esforços seria mais rigorosa. A estrutura do edifício é simulada por elementos de barra e de casca, sendo obtidos os esforços, as tensões e as deformações em cada elemento estrutural. Na Figura 8 apresenta-se a malha de elementos finitos utilizada para modelar o edifício (a cada tipo de elemento distinto é atribuída uma cor).

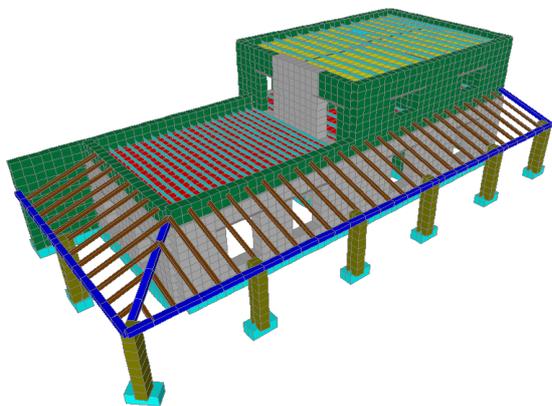


Fig .8. Malha de elementos finitos do modelo estrutural

Da verificação nas paredes de adobe do edifício dos esforços em termos de tensões normais, e por comparação com os valores admissíveis em compressão e tracção, respectivamente, verificou-se que estes últimos não são excedidos e, por isso, a estabilidade do edifício é assegurada.

Do dimensionamento da solução estrutural sustentável adoptada para o edifício em estudo chegou-se aos resultados expostos nas Figuras 9 a 11. Com estes resultados foi possível quantificar as quantidades de materiais inerentes à construção do edifício com base nesta

solução. Estes resultados resumem-se na Tabela IV (3ª coluna).

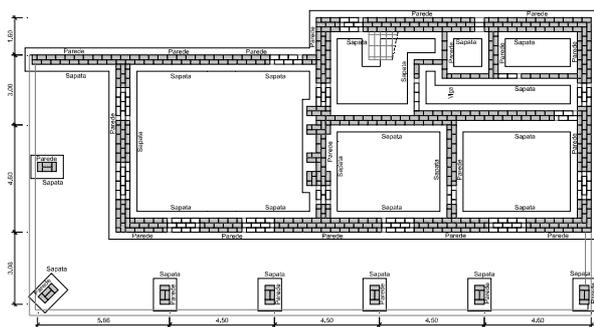


Fig .9. Planta de Fundações

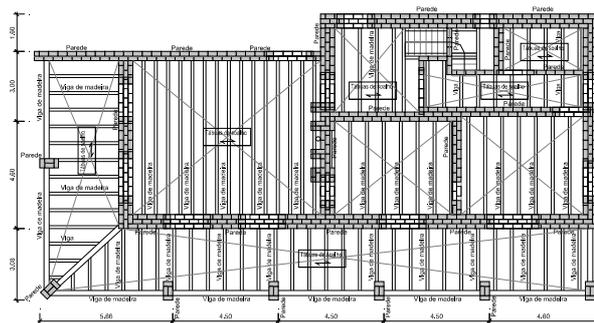


Fig .10. Planta Estrutural do Piso 1

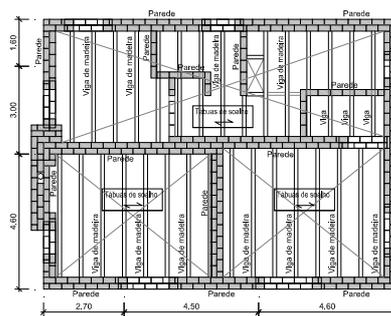


Fig .11. Planta Estrutural da Cobertura

5. Apresentação e Análise dos Resultados

A qualquer material de construção está sempre associado um consumo energético e um teor de emissão de gases poluentes para a atmosfera resultante da extracção da matéria-prima, do seu transporte, da sua eventual transformação noutra material, o transporte para a obra, entre outras tarefas. É possível estimar o consumo destes parâmetros ambientais associado a cada uma das tarefas e, consequentemente, de todo o ciclo de vida útil de um dado material.

Existem diversos estudos e bases de dados que compilam diferentes parâmetros, incluindo o gasto energético e o teor de emissão de gases poluentes para a atmosfera de uma vasta gama de materiais de construção e nos quais se incluem aqueles adoptados nas duas soluções estruturais estudadas. Neste trabalho foi adoptada a metodologia proposta por KangHee *et al.* (2007) [13] para a determinação dos parâmetros de gasto energético e de emissão de CO_2 relacionado com a construção de edifícios,

que serviu de base para a obtenção dos valores unitários de gastos energéticos e de emissões de CO₂ para os diferentes materiais de construção abordados no estudo apresentado neste artigo.

A análise de diversos estudos nesta temática, por exemplo [13] e [14], evidencia alguma discrepância nos valores propostos para estes parâmetros. Segundo [14], estas discrepâncias podem estar associadas a diferentes aspectos, associados à definição de diferentes ciclos de vida nas análises, a períodos de tempo diferentes, a diferentes sistemas de fabrico, entre outras. Na Tabela I apresentam-se alguns valores de referência do gasto energético de diversos materiais de construção propostos por diferentes autores.

TABELA I
GASTO ENERGÉTICO CATEGORIZADO POR MATERIAL DE CONSTRUÇÃO E POR AUTOR (MJ/KG)

	KangHee [13]	Leiden [15]	Baird [14]	Alcorn [14]
Betão	0.52	0.48	1.99	1.95
Aço	38.66	--	59.00	8.90
Argamassa	0.40	0.88	2.49	1.33
Tijolo	2.95	0.15	2.50	--
Blocos	0.06	--	0.42	--
Brita	0.15	--	0.30	0.10
Madeira	4.44	--	8.08	1.10
Areia	0.05	--	0.04	0.10
Cimento	3.33	--	8.98	7.80
Terra	0.05	--	--	--

Neste estudo, os gases poluentes estão convertidos em valores equivalentes de CO₂ e como unidade de funcional considerou-se a área total bruta de construção, que é igual a 391.5 m².

Os valores de gasto energético e de teor de emissão de CO₂ para a atmosfera apresentam-se nas Tabelas de II a V, para ambas as soluções estruturais estudadas para a construção de habitação unifamiliar considerada neste estudo.

TABELA II
GASTO ENERGÉTICO POR CATEGORIA DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO PARA A SOLUÇÃO ESTRUTURAL TRADICIONAL

Material	Unid.	Quant.	Gasto unitário (MJ)	Gasto material (MJ)
Betão	m ³	120.25	1292.24	155391
Aço	kg	6480.00	38.66	250491
Argamassa	m ³	24.80	961.40	23844
Cerâmicos	un.	12969.00	14.78	191703
Pedra	m ³	39.00	365.26	14245
Total				635674

TABELA III
TEOR DE EMISSÃO DE CO₂ POR MATERIAL DE CONSTRUÇÃO PARA A SOLUÇÃO ESTRUTURAL TRADICIONAL

Material	Unid.	Quant.	Gasto unit. (kg-CO ₂)	Gasto mat. (kg-CO ₂)
Betão	m ³	120.25	99.43	11956.07
Aço	kg	6480.00	3.72	24111.74
Argamassa	m ³	24.80	63.91	1585.06
Cerâmicos	un.	12969.00	1.11	14400.38
Pedra	m ³	39.00	26.90	1049.14
Total				53102.39

TABELA IV
GASTO ENERGÉTICO POR CATEGORIA DE MATERIAL DE CONSTRUÇÃO PARA A SOLUÇÃO ESTRUTURAL SUSTENTÁVEL

Material	Unid.	Quantidade	Gasto unitário (MJ)	Gasto material (MJ)
Adobes	un.	18000.00	1.45	26124
Pedra	m ³	128.60	365.26	46972
Argamassa	m ³	48.20	931.48	44897
Madeira	kg	16211.05	4.44	71995
Betão	m ³	28.00	1292.24	36183
Aço	kg	455.00	38.66	17589
Total				243760

TABELA V
TEOR DE EMISSÃO DE CO₂ POR MATERIAL DE CONSTRUÇÃO PARA A SOLUÇÃO ESTRUTURAL SUSTENTÁVEL

Material	Unid.	Quant.	Gasto unit. (kg-CO ₂)	Gasto mat. (kg-CO ₂)
Adobes	un.	17 300.00	0.09	1582.42
Pedra	m ³	85.00	26.90	3459.48
Argamassa	m ³	40.45	61.92	2984.65
Madeira	kg	16 250.00	0.38	6132.17
Betão	m ³	28.00	99.43	2783.95
Aço	kg	455.00	3.72	1693.03
Total				18635.69

A Tabela VI apresenta os valores globais totais dos parâmetros ambientais usados na comparação das duas soluções estruturais (tradicional e sustentável), adoptadas para a construção da habitação unifamiliar tipo estudada neste trabalho. A análise destes valores permite facilmente constatar que, para este caso de estudo, a solução estrutural sustentável apresenta valores dos dois parâmetros, gasto energético e teor de emissão de CO₂ para a atmosfera, significativamente inferiores aos obtidos para a solução estrutural tradicional. De facto, neste caso de estudo, estima-se que a opção da solução estrutural sustentável permite alcançar uma redução do gasto energético de 61.65% e uma redução de emissão de CO₂ de 64.9% (Tabela VI). Estes factos demonstram que a opção pela solução estrutural sustentável é ambientalmente bastante mais sustentável.

TABELA VI
COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS GLOBAIS POR UNIDADE FUNCIONAL PARA AS SOLUÇÕES ESTRUTURAS PROPOSTAS

	Solução Tradicional	Solução Sustentável	Melhor Solução	Redução (%)
Gasto energético (MJ/m ²)	1623.63	622.63	Sustentável	61.65
Emissão de CO ₂ (kg-CO ₂ /m ²)	135.61	47.61	Sustentável	64.90

6. Conclusões e Considerações Finais

Durante a realização deste trabalho de investigação foi constatado que ainda existe uma grande escassez de informação e regulamentação relativa à aplicação de

materiais naturais e, em particular, às alternativas de adobe de terra crua.

Diversos autores propõem valores unitários de gasto energético e de teor de emissão de gases poluentes para a atmosfera para materiais de construção que são divergentes. Pensa-se que a causa desta divergência esteja relacionada com o facto de serem considerados períodos temporais de vida do material distintos em cada estudo.

Neste trabalho, o período temporal adoptado corresponde ao tempo entre o início da obtenção da matéria-prima e termina na aplicação do material de construção em obra. Caso fosse adoptado o ciclo de vida completo do material como período temporal de análise seria necessário ainda contemplar as fases de manutenção, conservação, demolição e reciclagem.

A unidade funcional adoptada na quantificação dos parâmetros ambientais de gasto energético e de teor de emissão de gases poluentes para a atmosfera foi a área bruta de construção. O teor de emissão de gases poluentes para a atmosfera está convertido em teor equivalente de emissão de CO₂ para a atmosfera.

A comparação entre os valores obtidos para os dois parâmetros em cada solução estrutural estudada permitiu concluir que a solução estrutural sustentável é claramente a mais vantajosa em termos ambientais, havendo uma redução de gasto energético e de emissão de CO₂ superior a 60%.

O desenvolvimento de programas de cálculo que permitissem desenvolver projectos segundo a metodologia apresentada neste trabalho, e a proposta de regulamentação específica nesta matéria poderia estimular o recurso a materiais e soluções construtivas mais ecológicas.

Estes resultados podem contribuir para estimular a aplicação deste tipo de soluções estruturais (solução sustentável) ecológicas, quer em edifícios de habitação unifamiliar quer até em alguns edifícios de habitação colectiva ou outro tipo de construções.

Referências

- [1] <http://www.eartharchitecture.org/index.php?/archives/912-Adobe-Repository-for-Buddha-Statue.html>
- [2] Minke G. "Manual de construcción en tierra". Editorial fin de siglo. Uruguai, 2005.
- [3] Carvalho J., Pinto J., Varum H., Jesus A., Lousada J., Morais J. "Construção em tabique na região de Trás-os-Montes e Alto Douro". CINPAR 2008 – 4th International Conference on Structural Defects and Repair. Civil Engineering Department, University of Aveiro, Portugal, 2008.
- [4] www.greatwallchina.info
- [5] www.flickr.com/photos/negaheno
- [6] <http://www.canadianarchitect.com/issues/ViewPhoto.asp?pid=1000295879&stype=archive>
- [7] Cortés M. "Innovación tecnológica de construcción en tierra, posibilidades en la arquitectura contemporánea". VIII Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (VIII SIACOT) e do II Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con Tierra (II SAACT), CRIATIC-FAU-UNT, Argentina, 2009.
- [8] INE, "Mais de 70% dos alojamentos clássicos ocupados como residência habitual, situam-se na região de Lisboa e Vale do Tejo e região Norte". INE, Portugal, 1998.
- [9] CEN, "Eurocódigo 6 – Projecto de Estruturas e Alvenaria – ENV 1996-1". Bruxelas, 1995.
- [10] Decreto-Lei n° 235/85 de 31 de Maio. "Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes". Portugal, 1985
- [11] CEN, "Eurocódigo 5 – Projecto de Estruturas de Madeira – ENV 1995-1". Bruxelas, 1998.
- [12] "Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, REBAP". Aprovado pelo Decreto-Lei n° 349-C/83, de 30 de Julho; Portugal; 1983.
- [13] KangHee L., YoungOh C., Chang-U C., DaeHee K. "The estimation of the functional unit on energy consumption and CO₂ emission concerned with construction of building". SB07 Seoul Conference; Coreia do Sul, 2007.
- [14] Baird G., Alcorn A., Haslam P. "The energy embodied in building materials". IPENZ Transactions, Nova Zelândia, 1997.
- [15] http://www.pre.nl/simapro/impact_assessment_methods.htm#CML2