



**SMC**  
SUSTAINABLE MEDITERRANEAN CONSTRUCTION  
LAND CULTURE, RESEARCH AND TECHNOLOGY  
**magazine**

FOCUS ON  
**RAMMED EARTH**

**LUCIANO EDITORE**

**N. ONE**  
2014

## SCIENTIFIC COMMITTEE

Mohamed BELMAAZIZ  
Aasfaw BEYENE  
Claudia BLOOM  
Gaia BOLLINI  
Mario Buono  
Michele CAPASSO  
Paul CASALONGA  
Kambiz M. EBRAHIMI  
Graeme EVANS  
Daniel FAURE  
Pliny FISK  
Maria Cristina FORLANI  
Ángela Garcia Codoñer;  
Giorgio GIALLOCOSTA  
Rodolfo GIRARDI  
Mihiel HAM  
Stephane HANROT  
Jean Luis IZARD  
Fakher KARAT  
Pablo LA ROCHE  
Serge LATOUCHE  
Stefano LENCI  
Alberto LUCARELLI  
Gaetano MANFREDI  
Saverio MECCA

Giuseppe MENSITIERI  
Lorenzo MICCOLI  
Alastair MOORE  
Michael NEUMAN  
Joao NUNES  
Silvia PIARDI  
Alberto PIEROBON  
Kuno PREY  
Khalid RKHA CHAHAM  
Susan ROAF  
Francois Noel ROSSI  
Marco SALA  
Piero SALATINO  
Antonello SANNA  
Gianni SCUDO  
Alfonso SENATORE  
Ali SHABOU  
Abdelgani TAYYIBI  
Nikolas TSINIKAS  
Michael VAN GESSEL  
Fani VAVILI  
Roland VIDAL  
Dilek YILDIZ  
Ayman ZUAITER

## REFeree BOARD

Manuela ALMEIDA  
Gaia BOLLINI  
James CHAMBERS  
Ana Maria DABIJA  
Maria Cristina FORLANI  
Pablo LA ROCHE  
Paulo MENDONCA  
Jo RAVETZ  
Marco SALA  
Khanmohammadi SHOAI B  
Jacques TELLER  
Fani VAVILI

## EDITORIAL BOARD

Editor in Chief  
Dora FRANCESE

First Editors  
Domenico CAPUTO  
Antonio PASSARO

Associate Editors  
Luca BUONINCONTI  
Domenico CALCATERRA  
Paola DE JOANNA  
Cristian FILAGROSSI A.  
Marina FUMO  
Fabio IUCOLANO  
Andrea MAGLIO  
Lia Maria PAPA  
Domenico PIANESE  
Rossella SIANI  
Marialuce STANGANELLI

Editorial Secretary  
Pierpaolo D' AGOSTINO  
Lina MASTRANGELO

Graphic Design  
Web Master  
Cristian FILAGROSSI A.  
Rossella SIANI

## STEERING COMMITTEE

Gigliola AUSIELLO  
Alfredo BUCCARO  
Luca BUONINCONTI  
Domenico CALCATERRA  
Domenico CAPUTO  
Carmine COLELLA  
Alba COSTA  
Pierpaolo D' AGOSTINO  
Gabriella DE IENNER  
Paola DE JOANNA

Cristian FILAGROSSI A.  
Francesco FITTIPALDI  
Dora FRANCESE  
Manuela FRANCO  
Marina FUMO  
Fabio IUCOLANO  
Fabrizio LECCISI  
Mario LO SASSO  
Andrea MAGLIO  
Lina MASTRANGELO

Vincenzo MORRA  
Lia Maria PAPA  
Antonio PASSARO  
Elvira PETRONCELLI  
Domenico PIANESE  
Daniela PISCOPO  
Francesco POLVERINO  
Rossella SIANI  
Marialuce STANGANELLI  
Rosamaria VITRANO

SMC is the official annual magazine of the SMC - Sustainable Mediterranean Construction Association Founded on March 1st 2013 Via Posillipo, 69 80123 Naples - Italy [www.sustainablemediterraneanconstruction.eu](http://www.sustainablemediterraneanconstruction.eu) [smc.association@mail.com](mailto:smc.association@mail.com)

ISSN-online: 2420-8213

SMC N. 1 - 2014

Publisher:  
Luciano Editore  
Via P. Francesco Denza, 7  
P.zza S. Maria La Nova, 4  
80138 Naples - Italy  
[www.lucianoeditore.net](http://www.lucianoeditore.net)  
[info@lucianoeditore.net](mailto:info@lucianoeditore.net)  
[editoreluciano@libero.it](mailto:editoreluciano@libero.it)

All the articles of SMC magazine were exposed to a double peer blind review.

Cover Photo © Rossella Siani 2013

- ANGELILLO Maurizio, Department of Civil Engineering, University of Salerno (ITALY)
- ATHANASSIOS Balasas, civil engineer, Technological Educational Institute of Serres, (GREECE)
- AUSIELLO Gigliola, Department of Civil, Buildings and Environmental Engineering, University of Naples "Federico II" (ITALY)
- BAYON Jacqueline, Université Jean Monnet, École Doctorale des Sciences Humaines et Sociales -PRES de LYON -IERP- Institut des Études Régionales et des Patrimoines- ISTHME, CNRS. Saint-Étienne- (FRANCE)
- BEN ALI Fouad, Architect, Bechri 4231 Souk Lahad Kèbili (TUNISIA)
- BILAL Essaid, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, Département GENERIC-UMR6425 Saint-Étienne- (FRANCE)
- BUONINCONTI Luca, Ph.D. in Technology of Architecture, Department of Architecture, University of Naples "Federico II" (ITALY)
- CALZOLARI Marta PhD in Technology of Architecture, Department of Architecture, University of Ferrara, (ITALY)
- CAPUTO Domenico, Department of Chemical and Material Engineering, University of Naples "Federico II" (ITALY)
- CHIESA Giacomo, DAD Department, Politecnico di Torino, (ITALY)
- DAVOLI Pietromaria, PhD - Department of Architecture, University of Ferrara (ITALY)
- DE JOANNA Paola, Department of Architecture, University of Naples "Federico II" (ITALY)
- DE PAOLI Orio, DAD Department, Politecnico di Torino, (ITALY)
- ESCORTEGANHA Márcia Regina, Université Jean Monnet, École Doctorale des Sciences Humaines et Sociales -PRES de LYON -IERP- Institut des Études Régionales et des Patrimoines- ISTHME, (UMR 5600 EVS Environnement Villes et Sociétés). CNRS. Saint-Étienne- (FRANCE) e Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (BRASIL)
- FANI Vavili, architect, professor, School of Architecture, Aristotle University of Thessaloniki (GREECE)
- FORLANI Maria Cristina, Department of Architecture, University "G. D' Annunzio" of Chieti-Pescara, sezione DePT, (ITALY)
- FORNARO Domenico, Direzione regionale per i beni culturali e paesaggistici del Molise, Campobasso (ITALY),
- FORTUNATO Antonio - Department of Civil Engineer, University of Salerno (ITALY)
- FRANCESE Dora, Department of Architecture, University of Naples "Federico II" (ITALY)
- FUMO Marina, Department of Civil, Buildings and Environmental Engineering, University of Naples "Federico II" (ITALY)
- GIUSTO Rosa Maria, Ph.D., Adjunct Professor, University of Salerno (ITALY)
- IUCOLANO Fabio, Department of Chemical and Material Engineering, University of Naples "Federico II" (ITALY)
- LANER, Franciele, Instituto Federal de Santa Catarina- IFSC- (BRASIL)
- LECCISI Fabrizio, University of Naples "Federico II" , D.I.C.E.A (ITALY)
- LENCI Stefano, Department of Civil and Buildings Engineering, and Architecture, Polytechnic University of Marche (ITALY)
- LIGUORI Barbara, Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale, University of Naples "Federico II" , (ITALY)
- LORUSSO Flaviano Maria, University of Florence - DIDA Department of Architecture (ITALY)
- MASTROLONARDO Luciana, Architecture Department, University "G. D' Annunzio" of Chieti-Pescara, sezione DePT, (ITALY)
- MENDONCA Paulo, Architecture School, University of Minho, Guimarães, (PORTUGAL)
- MIHAILA Marina, Project Director – Researcher, Center for Studies in Contemporary Architecture, Bucharest, (ROMANIA)
- Lecturer Ph.D.Architect, "Ion Mincu" University of Architecture and Urbanism Bucharest, (ROMANIA)
- MILANO Patrizia, Department of Architecture, University "G. D' Annunzio" of Chieti-Pescara, (ITALY)
- NAFSIKA Exintaveloni, graphic designer, Technological Educational Institute of Athens (GREECE)
- NISTICO' Paola Francesca, University of Naples "Federico II" , D.I.C.E.A (ITALY)
- PACCOUD Grégoire, Arch. DPLG, DSA Architecture de Terre CRATERRE-ENSAG-AE&CC, Grenoble (FRANCE)
- PENNACCHIO Roberto, Arch., CRD-PVS Polito specialized, PhD student DAD, Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, (ITALY)
- PISCOPO Daniela, CITTAM - Architecture Department, University of Naples "Federico II" , (ITALY)
- QUAGLIARINI Enrico, Department of Civil and Buildings Engineering, and Architecture, Polytechnic University of Marche (ITALY)
- SANNA ANTONELLO, Department of Civil, Environmental Engineering and Architecture, University of Cagliari (ITALY)
- VATTANO Starlight, Department of Architecture, University of Palermo (ITALY)

# EARTH ARCHITECTURE IN NORTH OF PORTUGAL - CASE STUDY FROM VERNACULAR TO CONTEMPORARY

Paulo Mendonça

## 1. Introduction

It can be said that sustainable construction means “not to build” as since the Neolithic that Man started to exploit resources more than nature by itself can give. Of course that this scenery got much worse after the Industrial Revolution and especially in the end of the twentieth century, giving rise to a post-industrial environmental consciousness, that lead to three main operative strategies on developed countries, as represented on Figure 1: new techniques with natural materials and traditional techniques with industrialized materials (low-tech approach); and new materials with new techniques using the minimum materials possible (light-tech approach). Nowadays, it can be concluded that a really sustainable use of resources is only still possible in those areas of the planet that were isolated from the consumer society, where the human relationship with nature allowed a simple life in harmony with the natural surroundings, as in a pre industrial revolution scenario, even if we consider that the industrial revolution arrived much later to construction industry. Even in industrialized countries, such as in Portugal, till approximately 50 years ago, heavyweight materials present in construction were still in direct relation with the natural resources available in the subsoil. The heavyweight parts of the building were mostly the structural envelope walls, in stone, earth or brick; that could easily arrive to 1000kg/m<sup>2</sup>. In comparison, pavements and coverings in structural timber only weight between 50 and 150kg/m<sup>2</sup>. A typical view of the inner part of this type of building can be seen on Figure 2. The lithological map of the Portuguese territory shows that the walls of traditional constructions were in general the same of the surrounding subsoil, as it can be seen on Figure 3. Granite or schist stone was used in North regions,

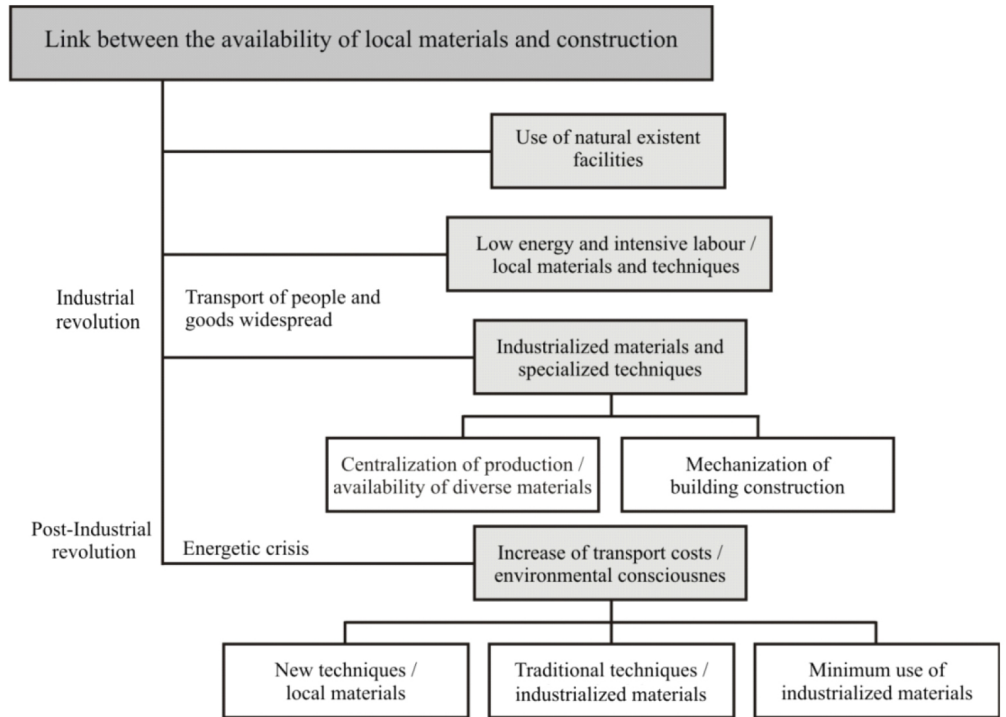


Fig. 1 - Link between the availability of local materials and construction.



Fig. 2 - Inner view of a building with stone walls and timber roof.

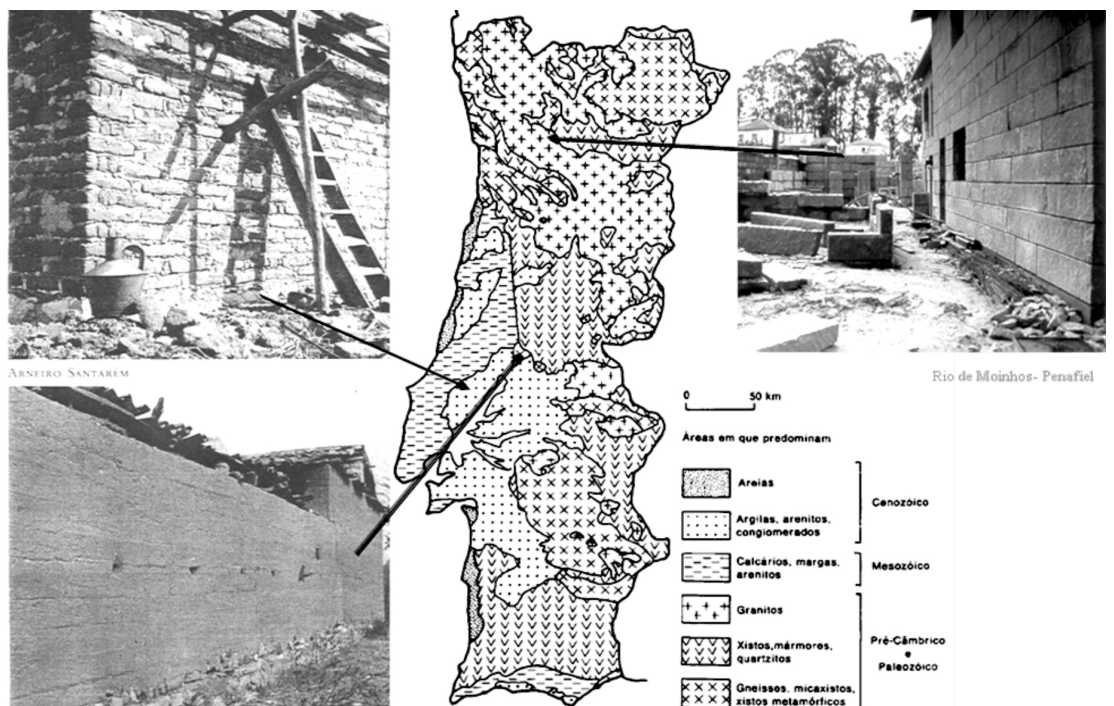


Fig. 3 - Link between the availability of local materials and construction.



Fig. 4 - Contemporary house with steel reinforced concrete structure, hollow brick walls and beam and pot slabs.



Fig. 5 - “Taipa de fasquio” / “Taipa de rodizio” – Wattle and daub / Daub and half-timbered techniques in a same wall, on a traditional house located in Guimarães historical center, Portugal.

Lime stone in some South regions, and where no stone exists in the subsoil, construction adopted earth wall solutions. In Portugal the majority of earth vernacular constructions are the rammed earth in the south (Algarve and Alentejo regions). In the north, the word “rammed earth” was used to designate another technique, which consists on a wooden structure where earth, sometimes mixed with clay and stone, is used to fill in the empty spaces between the timber elements. “The construction of rammed earth buildings was not exclusively limited to construction techniques. It also reflected social, economic and cultural aspects of each community and of each era. As the construction of a rammed earth house traditionally involved groups of neighbours, it gave rise to and encouraged a community spirit of helping each other” (Rocha, 2005). In Portugal, as well as in most south European countries, the most common constructive system is nowadays composed of steel reinforced concrete structure filled in walls and slabs by industrialized hollow brick. The concrete

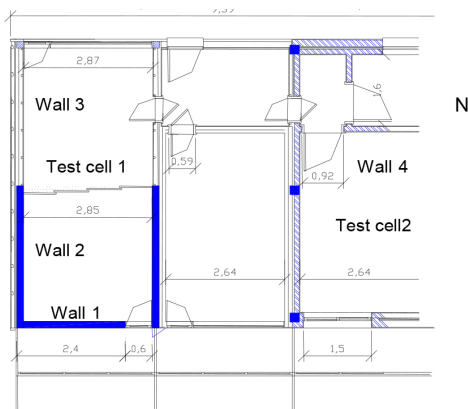


Fig. 7 - Test cells plan.

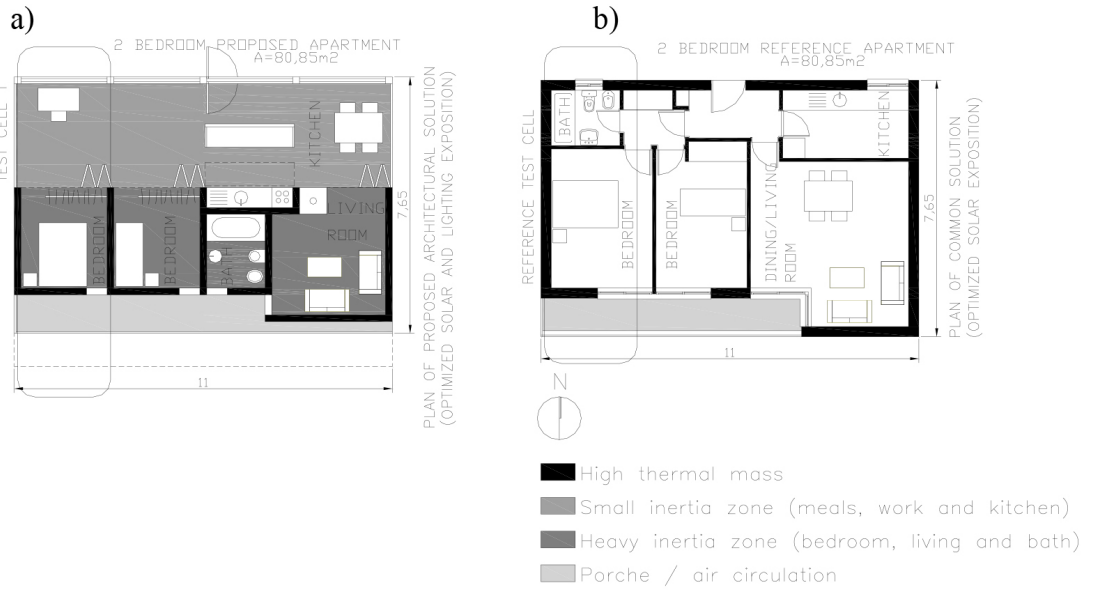


Fig. 6 - Plans of proposed and conventional housing units (Mendonça 2005).

structure, beam and pot slabs and hollow brick walls weight approximately 350kg/m<sup>2</sup>, both in pavements as well as in conventional walls, as represented on Figure 4. Global weight of buildings is nowadays similar to values of 50 years ago but with great environmental problems due to:

- decrease of recycling possibilities (components are mostly glued or “wet” joined and not mechanically or “dry” fixed);
  - use of industrialized materials, with high demands of energy in the production process, i.e. higher embodied energy;
  - less local availability of materials used.
- Environmental impact of contemporary buildings during the construction phase can be reduced by

using more lightweight construction materials and systems. But a lightweight building can have problems in terms of thermal comfort in a temperate climate, because of the reduced thermal inertia, what increases the environmental impacts related with building occupancy. The introduction of some thermal mass is essential to achieve comfort with minimum use of mechanical heating and/or cooling systems, i.e. using passive systems. Structural earth is not a common solution in north of Portugal, even in past traditional constructions. But, as it was referred before, non structural use of earth was common, using adobe to fulfill timber grid structures of two kinds, that are shown on Figure 5. This solution was called as a type of rammed earth (Taipa in Portuguese) in the north of Portugal – “Taipa de

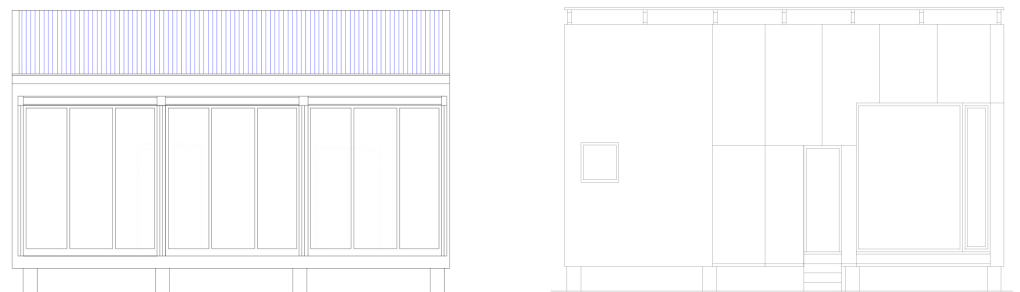


Fig. 8 - Test cells vertical scheme of the north and south façades.

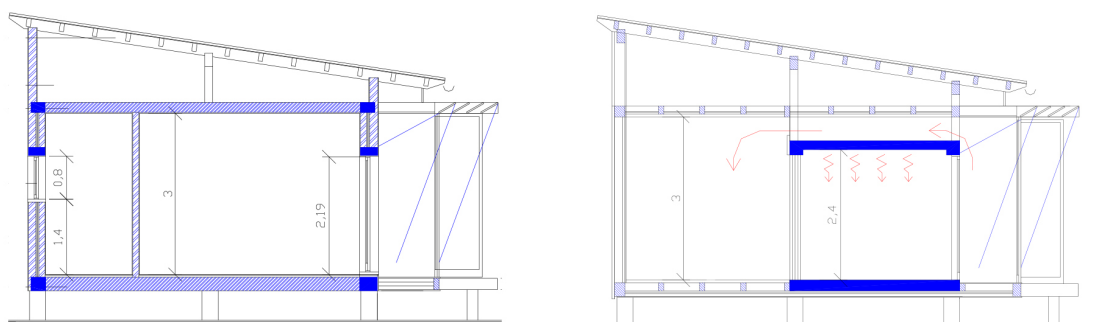


Fig. 9 -Vertical sections of test cells 1 and 2 – sunspace configuration (distances in m).

South facade configuration	BTC 1 (proposed)		BTC 2 (conventional)	
	Cooling	Heating	Cooling	Heating
1: Without ext. window on south facade	276	1.362	263	1.657
2: Dynamic wall with green-house effect	266	768	244	1.481
3: Attached sunspace	389	759	356	1.252
	Global		Global	
1: Without ext. glass on south facade	1.638		1.920	
2: Dynamic wall with green-house effect	1.034		1.725	
3: Attached sunspace	1.148		1.608	
4: Without complementary window (or opened complementary window) on Summer and Attached Sunspace on Winter (closed complementary window)	1.034		1.496	

Tab. 1 - Heating, cooling and global energetic needs [kWh/year].

	Embodied energy EE [kWh/m <sup>2</sup> ]	Materials transport energy [kWh/m <sup>2</sup> ]	EE + transport energy [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energy consumption with heating needs in lifetime [kWh/m <sup>2</sup> ]	Global energy consumption in lifetime [kWh/m <sup>2</sup> ]
<b>BTC 1</b>	945	121	1.066	2.164	<b>3.230</b>
<b>BTC 2</b>	2.751	242	2.993	4.088	<b>7.081</b>

Tab. 2 - EE, materials' transport energy and energy heating needs in a 50 year period by square meter of p.a. on both BTCs with attached sunspace.

<b>BTC 1 (Proposed)</b>	Weight (kg)	EE (kWh)
Cost by elements' positioning		
1 – Foundation	7.211	2.758
2 – Pavement	7.010	3.800
<b>3 – Walls, doors and windows</b>	<b>9.678</b>	<b>4.645</b>
4 – Ceiling	5.474	2.604
5 – Covering	1.200	2.255
<b>Total</b>	<b>30.574</b>	<b>16.062</b>
Pavement area 17m <sup>2</sup>		
<b>Total / m<sup>2</sup> (with timber frame on complementary window of sunspace)</b>	<b>1.798</b>	<b>945</b>

<b>BTC 2 (Conventional)</b>	Weight (kg)	EE (kWh)
Cost by elements' positioning		
1 – Foundation	7.211	2.758
2 – Pavement	10.194	4.661
<b>3 – Walls, doors and windows</b>	<b>17.702</b>	<b>27.917</b>
4 – Ceiling	8.890	3.669
5 – Covering	1.200	2.255
<b>Total</b>	<b>45.198</b>	<b>41.260</b>
Pavement area 15m <sup>2</sup>		
<b>Total / m<sup>2</sup></b>	<b>3.013</b>	<b>2.751</b>

Tab. 3 - EE and gross weight of the materials on both BTC, by elements' positioning

	Economical cost of construction [€/m <sup>2</sup> ]	Economical cost with heating needs (50 years) [€/m <sup>2</sup> ]	Total economical cost (50 years) [€/m <sup>2</sup> ]
<b>BTC 1</b>	1.111	214	<b>1.325</b>
<b>BTC 2</b>	1.267	404	<b>1.671</b>

Tab. 4 - Construction and operating economical costs in a lifetime of 50 years per square meter of pavement area on both BTC with attached sunspaces (Mendonça 2005).

Fasquio" and "Taipa de Rodízio" (wattle and daub / daub and half-timbered, respectively). A mixed-weight system with non structural adobe walls, in order to achieve an ideal compromise between hygrothermal performance and environmental impact of construction in housing buildings, was proposed by the author (Mendonça 2005).

## 2. Proposed design strategy

Based on the mixed-weight system referred previously, an energy optimization strategy was applied to a proposed solution, which can be called a thermal zoning system and was developed essentially based on two distinct approaches: façade design optimization – indirect gains; and thermal storage optimization – mixed-weight strategy.

In spite of its lower thermal gains than on direct gain, an indirect gain solution can more effectively guarantee that the project values are closer to reality, because it does not rely on the occupants or even on the occupancy, so the strategy chosen for the proposed design was this.

An example of the proposed thermal zoning architectural solution and of the conventional architectural solution can be observed in Figure 6 a) and b), respectively. The solutions shown in Figure 6 were transposed for two test cells, which were called building test cells - BTC. BTC 1 is the proposed solution, presented in plan on Figure 7, façade on Figure 8 and in section on the right side of Figure 9, and BTC 2 is the conventional solution, presented in Plan on Figure 7, façade on Figure 8 and in section on the left side of Figure 9.

## 3. Characterization of the test cells

Both BTCs have a rectangular shape (approximately 6,5x3,1m), are north/south oriented and have a telescopically moveable window on the south façade in order to allow this space to work as a sunspace or a dynamic/trombe wall.

BTC 1 is divided in two parts separated by a timber moving partition: 1 – an heavyweight south oriented zone (sleeping area) with a concrete structure, pavement and ceiling slabs, adobe walls; 2 – a lightweight north oriented zone with timber structure and sandwich pavement, ceiling and walls. In the heavyweight area there are two types of walls whose positions are indicated on Figure 7: Wall 1 is an adobe wall without insulation and a black exterior finishing, suitable for thermal gains; Wall 2 (Figure 7a)) is a double leaf wall with a 15cm adobe leaf on the interior; a fiber-wood cement board exterior ventilated leaf with a 15cm air gap including 5cm of expanded cork insulation. The north oriented zone (working area) has sandwich panels lightweight pavement and ceiling made with fiber-wood/cement board and expanded cork insulation and triple leaf walls with an exterior ventilated 15cm air gap and an interior layer with 8cm of expanded cork and 2cm of coconut fiber (Figure 7b).

BTC 2 is shown on the right side of Figure 7, has the same dimensional characteristics of BTC 1, but is made with a conventional construction solution. This test cell corresponds to the most common construction system in the contemporary Portuguese buildings –based on a steel reinforced concrete structure, with pavement and ceiling on beam and pot slabs – with pre-stressed concrete "T" beams. The exterior walls are double leaf (15+11cm) hollow brick with 4 cm of extruded polystyrene insulation (XPS) placed in the air gap and finished with plaster on both sides. Figure 11c) show the vertical section detail of this wall.

Figure 10 shows a group of exterior views from the building test cells in several construction phases. These test cells were monitored in order to carry out experimental tests. It was performed an evaluation of the hygrothermal performance in both test cells. The results are presented in the following paragraphs.

## 4. Performance evaluation

The performance evaluation can be divided in two parts: 1 – the predictions before the

test cells construction; 2 – the “in-situ” evaluation. The first part of the evaluation was carried out to help choosing the best design (both in thermal comfort operation cost and in embodied energy construction cost). The second part of the evaluation intended to verify the hygrothermal comfort performance and viability of the proposed construction.

#### 4.1. Comfort operation cost and environmental construction cost

Both BTC solutions were previously evaluated under the thermal performance point of view, using the RCCTE (Portuguese thermal regulation) (RCCTE 2006) and the CSTB estimation methods (CSTB 1988), for three possible configurations of south façade, which results are presented on Table 1.

The preference was for a good thermal performance in winter rather than in summer, that is why the solution of attached sunspace was the adopted (Mendonça 2005). Beyond the favourable values foreseen for the heating needs, the sunspace allows a useful area advantage that can be used as circulation in the proposed architectonic solution, although it does not represent a significant increase of cost in relation to a thermal storage or a trombe wall system. From the analysis of the estimated values, it can be concluded that the ideal solution would be to count on the performance of a Dynamic Wall with green-house effect in the summer and an attached sunspace in the winter. As this is not viable in a real situation, considering a sunspace with possibility of opening in the Summer would lead to values for the heating necessities closer to case 1 (without complementary glass in the south façade).

A comparative study on the embodied energy of the construction materials and transport consumption of each BTC was also done, and it was concluded that BTC 1 presented an energy global cost of 1.066kWh/m<sup>2</sup> of pavement area (p.a.). BTC 2 presents an energy global cost of 2.993kWh/m<sup>2</sup> of p.a., as it can be seen on Table 2. The Embodied Energy (EE) of the materials was estimated from values in kWh/kg of material and converted in kWh/m<sup>2</sup> of p.a.. This evaluation parameter brought a significant advantage for BTC 1, with 945kWh/m<sup>2</sup> of p.a., while BTC 2 presented an estimated value of 2.751kWh/m<sup>2</sup> of p.a.. This advantageous difference for the proposed solution could also be higher, if in the end of the expected life span (50 years), the reuse, recycling or the combustion value of the timber used in the structure on the lightweight area of BTC 1 was considered. BTC 2 materials are non-reusable, recycling is not economically viable and have no combustion value (except for the roof structure, which presents the same timber system of BTC 1).

The estimated heating energy consumption, for a 50 year period, was of 2.164kWh/m<sup>2</sup> of p.a. on BTC 1 and of 4.088kWh/m<sup>2</sup> of p.a. on BTC 2, what is equivalent to almost half of the total energy consumption in an overall life cycle analysis. Based on this study it can be stated that the greatest energy consumption of a current conventional housing building in Portugal, even optimized under the hygrothermal point of view is due to the construction phase itself and most especially to façade elements – walls



Fig. 10 - Exterior views of the building test cells construction works.

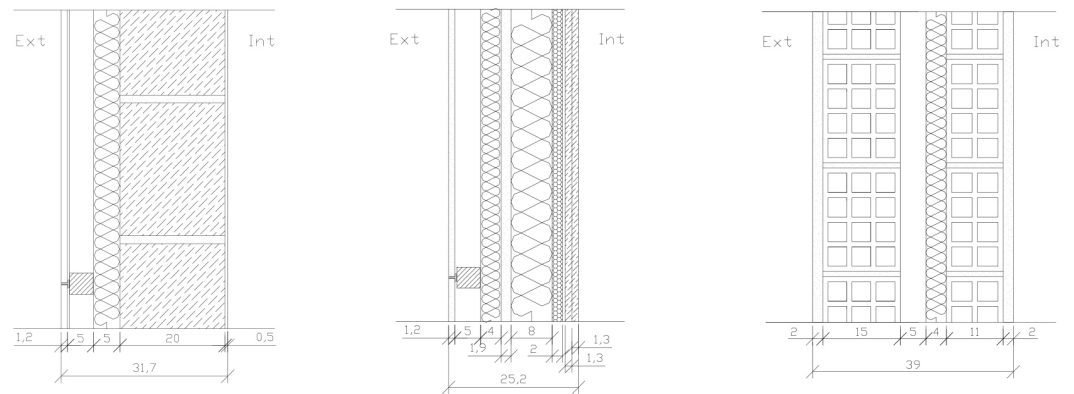


Fig. 11 - a) Mixed-weight double leaf wall PMD2.1/15 – wood/cement board, air gap, cork insulation, adobe; b) Triple lightweight wall PT(L)3.1 – wood/cement board, air gap, cork insulation, sandwich panel; c) Heavyweight double leaf wall PD1.2/15 – Hollow brick and XPS Insulation on the air-gap.

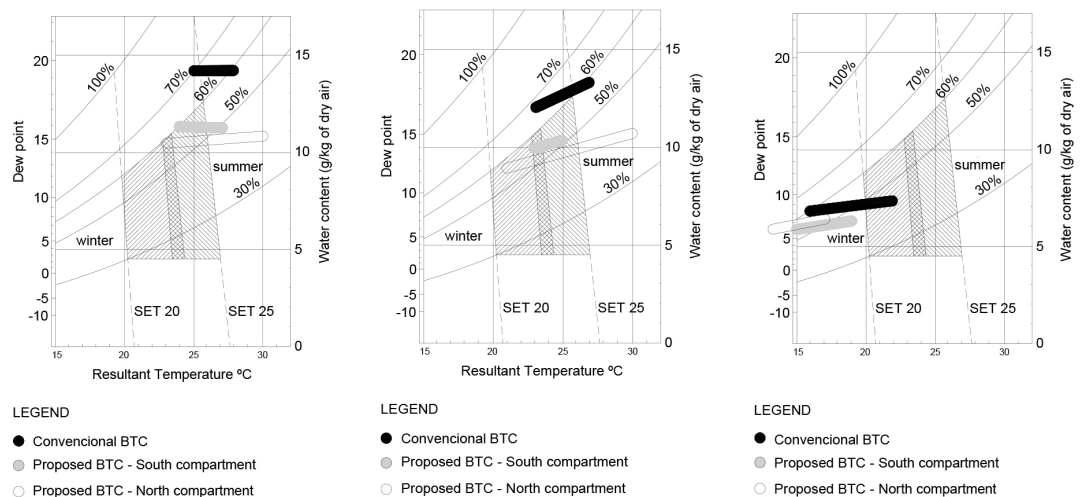


Fig. 12 a) Comfort evaluation on ASHRAE’s comfort chart in the end of summer (15 till 21<sup>st</sup> September – opened partition on BTC 1; b) Comfort evaluation on ASHRAE’ s comfort chart in the end of spring with high temperatures (14 till 20<sup>th</sup> May – closed partition on BTC 1; c) Comfort evaluation on ASHRAE’ s comfort chart in the autumn, with low temperatures (12 till 16<sup>th</sup> November – closed partition on BTC 1)

and windows, as it can be seen on Table 3. Both BTC in their final configuration were also compared from the economical/energy aspects:

- BTC 1 presents an economical cost slightly advantageous compared to BTC 2. The

economical construction cost (including materials and handwork) of BTC 1 was of 18.889€, while on BTC 2 was of 19.002€. This advantage became more significant when the specific cost per square meter of pavement area was considered. As BTC 1

walls are thinner than those of BTC 2, the pavement area of BTC 1 is of 17m<sup>2</sup>, while the pavement area of BTC 2 is of 15m<sup>2</sup>. The economical construction cost per square meter of pavement area is of 1.111€/m<sup>2</sup> to BTC 1 and of 1.267€/m<sup>2</sup> to BTC 2, as it can be seen on Table 5;

- operating energy, in terms of heating needs, and considering a lifetime of 50 years, was converted in economical cost. This study was only for the heating needs, as it was considered that Cooling Needs on littoral coastal areas of the north of Portugal, where this study was undertaken, generally do not produce energetic consumptions, as natural ventilation during the night hours is usually enough to fulfill the Cooling Needs on Summer. BTC 1, with the attached sunspace, presented an estimated cost for the Cooling Needs of 214€/m<sup>2</sup> of p.a., while BTC 2 presented a cost of 404€/m<sup>2</sup> of p.a, as it is shown on Table 4.

The estimated total economical cost is of 1.325€ for BTC 1 and of 1.671€ for BTC 2. The parcel corresponding to the energy cost to fulfill the heating needs is reduced, even if considered a 50 year period.

#### 4.2. Experimental study

The movable partition on BTC 1 allowed the experimental evaluation of two distinct compartment layouts, both by hygrothermal measurements. A significant thermal lag difference due to compartment layouts can be verified by the analysis of the operative temperature charts.

With the partition opened on summer, only BTC 1 presented values partially inside the comfort zone of the ASHRAE comfort chart, being the south compartment of this Cell almost always inside the comfort zone, as it can be seen on Figure 12a). With the partition closed and high exterior ambient temperature, only BTC 1 presented values totally inside the comfort zone on south compartment and partially inside this zone on north compartment, even if the thermal lag was significant – approximately 7°C. BTC 2 was always outside the comfort zone even if it was by a small difference, essentially due to relative humidity, as it can be seen on Figure 12b).

With the partition on BTC 1 closed during the measurements period with low temperatures, only BTC 2 presented values partially inside the comfort zone. BTC 1 presented a minor difference for the comfort zone on the south compartment, yet with relative humidity values slightly lower than the rest of the studied compartments, as it is shown on Figure 12c).

#### 5. Conclusions

The example presented shows how the global energy costs of the proposed contemporary earth solution, evaluated on a real scale test cell, allows reaching at least a 40% reduction when compared with a conventional test cell and could even allow reaching a 60% reduction. It can also be concluded that the economical cost of the proposed building solution was essentially due to intensive hand labour and other non-energy related costs and less to the materials' embodied

energy, what is a positive aspect from the environmental point of view. The Proposed BTC presented also more favourable experimental hygrothermal results during the cooling season but slightly more unfavourable on the heating season. In terms of relative humidity BTC 1 was always more favourable, because measured values were under 60% in most of the evaluated periods, while BTC 2 reached values over 70%, especially during summer, what is going to limit the comfort as well as durability and indoor air quality. This was caused by the inferior hygroscopic inertia of the hollow brick in comparison with the earth wall solution.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The author wish to thank FCT (Fundação para a Ciência e Tecnologia – Portugal) for supporting the test cells for non Conventional Buildings Project.

#### REFERENCES

- [1] ASHRAE 1997. "Handbook of Fundamentals"; American society of heating, refrigeration and air-conditioning engineers, Inc., Atlanta.
- [2] Brito, R. "Portugal, Geographic profile" (in Portuguese); Editorial Estampa; Lisboa, 1994.
- [3] CSTB 1988. "Règles Th-BV, règles de calcul du coefficient de besoins de chauffage des logements - annexes"; cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, livraison 292, cahier 2274; Paris, Septembre.
- [4] Mendonça, P. 2005. "Living under a second skin – strategies for the environmental impact reduction of Solar Passive constructions in temperate climates" (in Portuguese) Doctorate Thesis in Civil Engineering; University of Minho, Civil Engineering Department, Guimarães, Portugal.
- [5] RCCTE 2006. "Portuguese Building Performance Thermal Regulation" (in Portuguese); Decree-Law 80/2006, from 4<sup>th</sup> of April.
- [6] Rocha, M. 2005. "Rammed earth in traditional architecture: construction techniques" in Earth Architecture in Portugal, Argumentum, pp22-26.

#### ARQUITECTURA EM TERRA NO NORTE DO PORTUGAL - CASO DE ESTUDIO DO VERNACULAR AO CONTEMPORANEO

##### 1. Introdução

Pode-se dizer que construção sustentável significa "não construir", uma vez que já a partir do Neolítico que o Homem começou a explorar mais recursos do que a natureza por si só lhe pode dar. Claro que este cenário piorou após a Revolução Industrial e, especialmente, no final do século XX, o que deu origem a uma consciência ambiental pós-industrial, que conduziu nos países desenvolvidos a três estratégias operativas fundamentais, como representado na Figura 1: novas tecnologias com materiais naturais e técnicas tradicionais com materiais industrializados (abordagem low-tech); e novos materiais com novas tecnologias que utilizam o mínimo material possível (abordagem light-tech). Hoje em dia, pode-se concluir que o uso sustentável dos recursos só é ainda possível naquelas áreas do planeta que ficaram isoladas da sociedade de consumo, onde a relação humana com a natureza permitiu uma vida simples em harmonia com o ambiente natural, como nos cenários pré-revolução

industrial, mesmo se considerarmos que a revolução industrial chegou muito mais tarde para a indústria da construção. Mesmo em países industrializados, como em Portugal, até há cerca de 50 anos atrás, os materiais pesados presentes na construção ainda estavam em relação direta com os recursos naturais disponíveis no subsolo. Os elementos pesados do edifício eram essencialmente as paredes estruturais da envolvente, em pedra, terra ou tijolo; que podem facilmente chegar a 1000kg/m<sup>2</sup>. Por outro lado, os elementos de pavimento e cobertura em madeira estrutural apresentavam um peso de apenas 50 a 150kg/m<sup>2</sup>. Uma vista típica do interior deste tipo de construção pode ser visto na Figura 2. O mapa litológico do território Português mostra que as paredes exteriores das construções tradicionais são, em geral, constituídas pelo mesmo material do subsolo próximo, como pode ser visto na Figura 3. Granito ou xisto era maioritariamente utilizado nas regiões Norte, mármore em algumas regiões do Sul, e onde não existia rocha no subsolo, a construção adoptava soluções de parede de terra. Em Portugal, a maioria construções de terra vernaculares são em taipa e localizam-se no sul (regiões do Algarve e Alentejo). No norte, a palavra "taipa" foi usada para designar uma outra técnica, a taipa de rodízio que consiste numa estrutura de madeira onde a terra, às vezes misturada com barro e pedra, é usada para preencher os espaços vazios entre elementos de madeira.

"A construção de edifícios em taipa não se limitou exclusivamente às técnicas de construção. Esta reflectiu também os aspectos sociais, económicos e culturais de cada comunidade e de cada época. Como a construção de uma casa de taipa envolvia tradicionalmente grupos de vizinhos, esta dava origem e incentivava o espírito de comunidade e de ajuda mútua" (Rocha, 2005).

Em Portugal, assim como na maioria dos países do sul da Europa, o sistema construtivo mais comum hoje em dia é o de estrutura porticada de betão armado preenchido em paredes e lajes por tijolo furado industrializado. Os elementos estruturais de betão representados na Figura 4, utilizados tanto nos pavimentos em lajes aligeiradas como nas paredes em tijolo, pesam aproximadamente 350kg/m<sup>2</sup>. O peso total dos edifícios é hoje em dia semelhante aos dos edifícios de há mais de 50 anos atrás, mas com um incremento dos impactos ambientais:

- diminuição das possibilidades de reciclagem (componentes são principalmente colados ou unidos por processos "húmidos" e não fixos mecanicamente ou por tecnologias "secas");
- uso de materiais industrializados, com elevados consumos energéticos no processo de produção, i.e. maior energia incorporada;
- menor disponibilidade local dos materiais utilizados.

O impacto ambiental associado com a fase de construção dos edifícios contemporâneos pode ser reduzido pelo uso de materiais e sistemas de construção mais leves. Mas, uma construção leve, pode apresentar problemas em termos de conforto térmico num clima temperado, por causa da reduzida inércia térmica, incrementando os impactos ambientais relacionados com a fase de utilização do edifício. A introdução de alguma massa térmica é essencial para alcançar o conforto com o uso mínimo de sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento mecânicos, ou seja, através de sistemas passivos. A terra estrutural não é uma solução comum no norte de Portugal, mesmo em construções vernaculares. Mas, como foi referido anteriormente, o uso não estrutural da terra era comum, utilizando estruturas de madeira, essencialmente de dois tipos, que são mostrados na Figura 5. Esta solução foi designada como um tipo de taipa no norte de Portugal - "Taipa de Fasquio" e "Taipa de Rodízio". Foi proposto pelo autor um sistema misto de peso, com paredes de adobe não estruturais, a fim de alcançar um compromisso ideal entre desempenho



higrotérmico e impacto ambiental de obras em edifícios de habitação (Mendonça 2005).

## 2. Estratégia de projeto proposta

Com base no sistema de peso misto referido anteriormente, foi aplicada a uma solução proposta uma estratégia de otimização de energia, que pode ser designada como um sistema de zoneamento térmico e foi desenvolvido essencialmente com base em duas abordagens distintas: otimização do sistema de fachada - ganhos indirectos; e otimização da inércia térmica - estratégia de peso misto. Apesar de apresentar menores ganhos térmicos teóricos do que uma solução de ganho direto, uma solução de ganho indireto pode garantir de forma mais eficaz que os valores de projeto fiquem mais próximos dos valores reais, porque não dependem tanto do comportamento dos ocupantes ou mesmo da ocupação, por isso, a estratégia escolhida para o projeto proposto foi essa. Um exemplo das soluções arquitectónicas proposta e convencional, pode ser observado na Figura 6 a) e b), respectivamente. As soluções apresentadas na Figura 6 foram transpostas para duas células de teste, designadas como células de teste de edifícios - BTC. BTC 1 é a solução proposta, apresentada em planta na Figura 7, alçado na Figura 8 e na secção do lado direito da Figura 9, e BTC 2 é a solução convencional, apresentada em planta na Figura 7, alçado na Figura 8 e em secção no lado esquerdo da Figura 9.

## 3. Caracterização das células de teste

Ambas as BTCs têm uma forma retangular (de aproximadamente 6,5 x3,1m), são orientadas a norte/sul e têm um envidraçado telescópico móvel na fachada sul, a fim de permitir que este espaço possa funcionar como estufa ou como parede acumuladora dinâmica / trombe. A BTC 1 está dividida em duas partes separadas por uma divisória móvel de madeira: 1 - uma orientada a sul pesada (área de dormir), com uma estrutura de betão nas lajes de pavimento e teto, paredes de adobe; 2 - uma zona leve orientada a norte com estrutura de madeira e pavimento, teto e paredes em painéis sandwich com madeira. Na área pesada existem dois tipos de parede cujas posições são indicadas na Figura 7: Parede 1 é uma parede de adobe, sem isolamento e acabamento exterior caiado a preto, adequado para ganhos térmicos; Parede 2 (Figura 7a)) é uma parede dupla com um pano de 15 centímetros interior em adobe, um pano exterior em placa de aglomerado de madeira / cimento ventilado com um espaço de ar de 15 centímetros incluindo cinco centímetros de isolamento de aglomerado negro de cortiça expandida. A zona orientada a norte (área de trabalho) tem painéis sanduíche, pavimento leve e teto feitos com placas de aglomerado de madeira / cimento e isolamento de aglomerado negro de cortiça expandida e paredes de folhas triplas com um exterior ventilada 15cm de caixa-de-ar e uma camada interior com 8cm de aglomerado negro de cortiça expandida e 2cm de fibra de coco (Figura 7b)). BTC 2 é mostrada no lado direito da Figura 7, tem as mesmas características dimensionais da BTC 1, mas é feita com uma solução de construção convencional. Esta célula de teste corresponde ao sistema de construção de edifícios contemporâneo mais comum em Portugal baseada em betão armado, com pavimento e tecto em lajes aligeiradas de betão - com vigotas pré-esforçadas em "T". As paredes exteriores são duplas (15+11cm) em tijolo furado com 4cm de isolamento de poliestireno extrudido (XPS) colocados na caixa-de-ar e acabamento com reboco em ambas as faces. A Figura 11c) mostra o corte vertical de pormenor desta parede.

## 4. A avaliação

A avaliação de desempenho pode ser dividida em duas partes: 1 - as previsões efetuadas previamente construção células de teste; 2 - a avaliação "in-situ". A primeira parte da avaliação foi realizada para ajudar a escolher o melhor projeto (tanto em custo de operação com o conforto térmico como no custo de construção em energia incorporada). A segunda parte da avaliação destinou-se a

verificar o desempenho de conforto higrotérmico e viabilidade da construção proposta.

Ambas as soluções BTC foram previamente avaliadas sob o ponto de vista de desempenho térmico, usando o RCCTE (regulamento térmico Português) (RCCTE 2006) e os métodos de previsão constantes no CSTB (CSTB 1988), para três configurações possíveis da fachada sul, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

A preferência foi para um melhor desempenho térmico no inverno do que no verão, por isso a solução de Estufa adossada foi a adotada (Mendonça 2005). Para além dos valores estimados de necessidades de aquecimento mais favoráveis, a Estufa adossada permitiu obter uma área útil que pôde ser usada como circulação na solução arquitectónica proposta, apesar de não representar um aumento significativo dos custos em relação a uma parede acumuladora ou de trombe. A partir da análise dos valores estimados, pode-se concluir que a solução ideal seria contar com o desempenho de uma parede dinâmica com efeito de estufa no verão e uma Estufa adossada no inverno. Como isso não seria viável numa situação real, considerou-se que uma Estufa adossada com possibilidade de abertura no Verão levaria a valores para as necessidades de aquecimento mais próximas ao caso 1 (sem vidro complementar na fachada sul). Foi também feito um estudo comparativo sobre a energia incorporada dos materiais de construção e energia de transporte de cada BTC, e concluiu-se que BTC 1 apresentou um custo global de energia de 1.066kWh/m<sup>2</sup> por área de pavimento (p.a). BTC 2 apresenta um custo global de energia de 2.993kWh/m<sup>2</sup> por p.a., como pode ser visto na Tabela 2.

A energia incorporada (EE) dos materiais foi estimada a partir de valores em kWh/kg de material e convertido em kWh/m<sup>2</sup> de p.a. Este parâmetro de avaliação trouxe uma vantagem significativa para a BTC 1, com 945kWh/m<sup>2</sup> de p.a., enquanto a BTC 2 apresentou um valor estimado de 2.751kWh/m<sup>2</sup> de p.a. Essa diferença poderia ser mais vantajosa para a solução proposta, se no final do tempo de vida esperado (50 anos), a reutilização, reciclagem ou o valor de combustão da madeira utilizada na estrutura da zona leve da BTC 1 fosse considerada. Os materiais da BTC 2 são não-recuperáveis, a reciclagem não é economicamente viável e não têm valor de combustão (exceto para a estrutura da cobertura, que apresenta a mesma solução em madeira da BTC 1). O consumo estimado de energia de aquecimento, por um período de 50 anos, foi de 2.164kWh/m<sup>2</sup> de p.a. na BTC 1 e de 4.088kWh/m<sup>2</sup> de p.a. na BTC 2, o que é equivalente a quase metade do consumo total de energia numa análise global do ciclo de vida.

Com base neste estudo pode-se afirmar que o maior consumo de energia de um edifício de habitação convencional contemporâneo em Portugal, mesmo otimizado sob o ponto de vista higrotérmico deve-se à fase de construção em si e mais especialmente aos elementos de fachada - paredes e janelas, como pode ser visto na Tabela 3.

Ambas as BTC na sua configuração final foram também comparadas a partir dos aspectos económicos/energéticos:

- a BTC 1 apresenta um custo económico pouco favorável em relação à BTC 2. O custo económico da construção (incluindo materiais e mão-de-obra) da BTC 1 foi de 18,889 €, enquanto que da BTC 2 foi de 19,002 €. Esta vantagem tornou-se mais significativa quando considerado o custo específico por metro quadrado de área de pavimento. Como na BTC 1 as paredes são mais finas do que na BTC 2, a área de pavimento da BTC 1 é de 17m<sup>2</sup>, enquanto a área de pavimento de BTC 2 é de 15m<sup>2</sup>. O custo económico da construção por metro quadrado de área de pavimento é de 1.111 €/m<sup>2</sup> para a BTC 1 e de 1.267 €/m<sup>2</sup> para a BTC 2, como pode ser visto na Tabela 5;

- a energia de utilização, em termos de necessidades de aquecimento, e considerando uma vida útil de 50 anos, foi convertida em custo económico. Este estudo considerou apenas as necessidades de aquecimento, uma vez que se assumiu que as necessidades de arrefecimento nas áreas costeiras do litoral do norte de Portugal, onde este estudo foi realizado, não produzem geralmente consumos energéticos, uma vez que a ventilação natural durante a noite é geralmente suficiente para satisfazer as necessidades de arrefecimento no verão. BTC 1, com Estufa adossada, apresentou um custo estimado para as necessidades de arrefecimento de 214 €/m<sup>2</sup> de p.a., enquanto a BTC 2 apresentou um custo de 404 €/m<sup>2</sup> de p.a., como é mostrado na Tabela 4.

O custo económico total estimado é de 1,325€ para a BTC 1 e de 1.671€ para a BTC 2. A parcela correspondente ao custo de energia para satisfazer as necessidades de aquecimento é reduzida, mesmo se considerado um período de 50 anos.

A divisória móvel na BTC 1 permitiu a avaliação experimental de duas configurações de compartimentação distintas, ambas efectuadas através de medições higrotérmicas. Uma significativa diferença no atraso térmico entre as configurações de compartimentação pode ser verificada na análise dos gráficos de temperatura resultantes. Com a partição móvel aberta no verão, só a BTC 1 apresentou valores parcialmente dentro da zona de conforto prevista no gráfico ASHRAE, encontrando-se o compartimento sul quase sempre dentro da zona de conforto, como pode ser visto na Figura 12a). Com a partição fechada e temperatura ambiente exterior elevada, só a BTC 1 apresentou valores totalmente dentro da zona de conforto no compartimento sul e parcialmente dentro desta zona no compartimento norte, mesmo com uma amplitude térmica significativa - cerca de 7 °C. A BTC 2 esteve sempre fora da zona de conforto, mesmo que fosse por uma diferença pequena, essencialmente devido aos valores de humidade relativa, como pode ser visto na Figura 12b).

Com a partição na BTC 1 fechada durante o período de medições com temperaturas baixas, apenas a BTC 2 apresentou valores parcialmente dentro da zona de conforto. A BTC 1 apresentou uma pequena diferença em relação à zona de conforto no compartimento sul, mas com valores de humidade relativa ligeiramente menor do que o resto dos compartimentos estudados, tal como é mostrado na Figura 12c

## 5. Conclusões

O exemplo apresentado mostra como os custos energéticos globais da solução contemporânea proposta, em terra, avaliados através duma célula de teste à escala real, foram pelo menos 40% mais reduzidos do que uma célula de teste convencional e poderiam até mesmo chegar a uma redução de 60%. Também se pôde concluir que o custo económico na solução construtiva proposta era essencialmente associado com a utilização de mão-de-obra intensiva e outros custos não relacionados com consumo de energia e menos com a energia incorporada dos materiais, o que é um aspecto positivo do ponto de vista ambiental. A BTC proposta apresentou também resultados higrotérmicos experimentais mais favoráveis durante a estação de arrefecimento, mas ligeiramente mais desfavoráveis na estação de aquecimento. Em termos de humidade relativa a BTC 1 apresentou sempre resultados mais favorável, porque os valores medidos foram de menos de 60%, na maioria dos períodos em análise, enquanto a BTC 2 atingiu valores superiores a 70%, especialmente durante o verão, o que iria limitar o conforto bem como durabilidade e qualidade do ar interior. Isto deveu-se essencialmente à inércia higroscópica inferior do tijolo furado em comparação com a solução de parede em terra.