

ARQUITECTURA ALTERNATIVA I: MATERIALS LOW-TECH.
Terra compactada.

Llum Ruiz Sanchis
Tutor: Manuel Lillo Navarro
Treball Final de Grau, juliol 2016
ETSAV-UPV



Vivim a un món canviant, de comportaments cíclics, errants. Els diversos moviments artístics i socials se succeïxen com a contraposició a les directrius prèvies. Cerquen la ruptura amb allò anterior a partir de la reflexió. Es reinventen, recuperen aspectes del passat per tornar a vendre's amb més força.

Les tècniques i els materials de construcció tradicionals han sigut revitalitzats en diverses ocasions, com a conseqüència de la industrialització, amb el moviment *Arts and Crafts*, i amb la crisi petroliera dels anys 70.

Ara, sembla que tornen a aparèixer buscant un lloc on quedar-se. És el moment d'un nou renaixement dels materials tradicionals com a resposta a la crisi mediambiental i al repte del nostre intel·lecte.

Dels avantatges, dificultats i relació amb la sostenibilitat dels materials low-tech parlarem a les següents pàgines per tal d'avançar cap a la normalització del seu ús contemporani.

Tenim les bases. Tot queda per construir.

Paraules clau: reflexió, reinventar, materials tradicionals, sostenibilitat, materials low-tech, repte, normalització, construcció.

Vivimos en un mundo cambiante, de comportamientos cíclicos, errantes. Los diversos movimientos artísticos y sociales se suceden como contraposición a las directrices previas. Buscan la ruptura con lo anterior a partir de la reflexión. Se reinventan, recuperan aspectos del pasado para volver a venderse con más fuerza.

Las técnicas y los materiales de construcción tradicionales han sido revitalizados en diversas ocasiones, como consecuencia de la industrialización, con el movimiento *Arts and Crafts*, y con la crisis petrolera de los años 70.

Ahora, parece que vuelven a aparecer buscando un lugar donde quedarse. Es el momento de un nuevo renacimiento de los materiales tradicionales como respuesta a la crisis medioambiental y al reto de nuestro intelecto.

De las ventajas, dificultades y relación con la sostenibilidad de los materiales low-tech hablaremos en las siguientes páginas con el fin de avanzar hacia la normalización de su uso contemporáneo.

Tenemos las bases. Todo queda por construir.

Palabras clave: reflexión, reinventar, materiales tradicionales, sostenibilidad, materiales low-tech, reto, normalización, construcción.

We live in a changeable world, made of cyclical, wandering behaviours. The several artistic and social movements come after each other as opposed to the previous guidelines. They seek a break with the past based on reflection. They reinvent themselves, they recover aspects from the past in order to sell themselves even stronger.

Traditional techniques and building materials have been revitalized in several times as a result of the industrialization, through the Arts and Crafts movement, and the oil crisis of the 70s.

Now, it looks like they appear again looking for a place to stay. It is the time of a new renaissance of the traditional materials as response to the environmental crisis and the challenge of our intellect.

In the following pages, we will talk about the advantages and difficulties of the low-tech materials, as well as their relation with sustainability in order to make progress towards the normalization of its contemporary use.

We have the basis. Everything is to be built.

Key words: reflection, reinvent, traditional materials, sustainability, low-tech materials, challenge, normalization, construction.

| | | |
|------|--|----|
| 0. | SOBRE EL TREBALL... | 6 |
| 1. | L'ELECCIÓ DE MATERIALS. ELS MATERIALS LOW-TECH... | 8 |
| 2. | LA SOSTENIBILITAT... | 10 |
| 2.1. | LA SOSTENIBILITAT AMBIENTAL... | 12 |
| 2.2. | LA SOSTENIBILITAT ECONÒMICA... | 16 |
| 2.3. | LA SOSTENIBILITAT SOCIAL... | 20 |
| 3. | REFLEXIÓ... | 24 |
| 4. | MARTIN RAUCH I LA CASA RAUCH... | 28 |
| 5. | AL BORDE I LA <i>CASA ENTRE</i> <i>MUROS</i> ... | 34 |
| 6. | INVESTIGACIONS... | 38 |
| 7. | CONCLUSIONS... | 44 |
| 8. | BIBLIOGRAFIA... | 60 |

0. SOBRE EL TREBALL

El següent treball realitza un estudi sobre els materials coneguts com a low-tech en general, i de l'aplicació de la terra compactada en particular.

Les conclusions d'aquest Treball Final de Grau són el resultat del procés d'estudi mateix. Es pot dir que s'estructura en dos blocs, *per què?* i *com?*

El primer bloc es basa en l'anàlisi de *per què* són adients, o no, els materials low-tech.

Es comença amb una primera consideració de la importància de l'elecció de materials i quins són els paràmetres que influeixen sobre aquesta. Es continua amb la introducció del terme *material low-tech*.

A continuació apareix el concepte de sostenibilitat global i quina és la relació dels materials low-tech amb aquesta des d'un plantejament ambiental, econòmic i social.

Finalment, es conclou el primer bloc amb una reflexió sobre quins són els principals obstacles per normalitzar la construcció amb materials low-tech, com és el cas de la terra compactada.

El segon bloc, *com?* naix amb l'anàlisi de dos casos pràctics d'arquitectura contemporània amb terra. D'aquesta forma es vol comprendre quins són els efectes pràctics de construir amb aquest material i els diversos sistemes constructius per dur-ho a terme.

En aquest bloc també es recopilen una sèrie d'investigacions dirigides a millorar les propietats de la terra com a material de construcció per tal de contextualitzar quina és la situació actual i valorar els resultats obtinguts.

Per últim, el bloc, i el TFG, conclouen amb un conjunt de reflexions sobre els diversos apartats. Finalitza amb la proposta de diversos detalls constructius que tenen com a base els materials low-tech. Aquests, es comparen amb altres possibilitats que es troben de forma similar als casos d'estudi i amb solucions més convencionals.

1. L'ELECCIÓ DE MATERIALS ELS MATERIALS LOW-TECH

Aquest Treball Final de Grau és el resultat d'un estudi dels materials low-tech, representa una reflexió sobre el seu ús des d'un plantejament de sostenibilitat i, per tant, la consideració de la seua viabilitat dins de l'elecció de materials.

En primer lloc, cal introduir el concepte d'arquitectura low-tech. Segons el llibre de Josep Maria Minguet, "l'arquitectura low-tech sorgix amb la crisi petroliera, oposant-se a la fredor de l'arquitectura moderna, i proposant una participació activa de l'usuari en la concepció i la realització de les construccions amb un marcat accent comunitari. Aquest moviment advoca per l'ús de la fusta, com a material càlid, lleuger i de fàcil col·locació en obra, com a element base i altres materials naturals com la terra."¹

No obstant, l'arquitectura low-tech o arquitectura de baixa tecnologia és la que també s'entén com a arquitectura tradicional. Aquesta fa ús de materials locals, fàcilment accessibles i econòmics pel que fa a la seua adquisició, però que requereixen d'un treball intensiu per a la seua posada en obra. És el màxim referent de la nostra

1 MINGUET, J.M. (2010). *Low-Tech architecture*. Barcelona: Monsa.

tradició constructiva, l'arquitectura més primitiva que definix els nostres orígens.

Aquest retorn cap als materials tradicionals ja apareix durant el segle XIX com a conseqüència de la revolució industrial amb moviments com l'*arts and crafts*. Figures com William Morris i John Ruskin promouen el treball artesanal davant la fabricació mecanitzada. Al segle XX l'obra de E.F.Schumacher, *Small is beautiful*, és clau en la defensa de la tornada a les tècniques senzilles ja que ho justifica des d'un punt de vista de sostenibilitat global (econòmica, social i mediambiental).

En relació amb l'elecció dels materials, s'observa que respon a uns criteris que es poden classificar segons els principis vitrubians de *venustas*, *firmitas* i *utilitas*. En primer lloc es troben els criteris estètics (*venustas*) com la textura, el color, el caràcter i la modulació. *Firmitas* fa referència a les característiques tècniques del material com són la resistència, la durabilitat i la compatibilitat entre els diversos materials. Per últim, *utilitas* comprén la funció del propi edifici. Dins de la funció de l'edifici i del material apareixen una sèrie

de criteris ecològics per garantir la sostenibilitat mediambiental.

A posteriori de la revolució industrial són principalment els criteris estètics i socials els que justifiquen els materials tradicionals. No obstant, la constatació de la degradació progressiva i irreversible del planeta ha donat pas a la consideració de paràmetres ecològics. Aquests, han pres en els últims temps tal importància en l'arquitectura amb motiu de l'impacte que la indústria de la construcció genera al medi ambient. Es calcula que "el sector de la indústria contribuïx fins un 30% de les emissions globals anuals d'efecte hivernacle i consumeix fins un 40% de tota l'energia. (...) Si no es fa res, les emissions de gas d'efecte hivernacle dels edificis seran més del doble en els pròxims 20 anys."²

Els estudis de cicle de vida d'un edifici mostren que el 80% d'aquestes emissions corresponen a l'ús del propi edifici (calefacció, il·luminació, etc). Altrament, entre el 10 i el 20% de l'energia consumida és resultat de la producció i el transport de materials,

2 UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2009). *Buildings and Climate Change. Summary for Decision-Makers*. <<http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

la construcció, el manteniment, la renovació i la demolició de l'edifici.³

Així, l'elecció dels materials d'un projecte és d'una elevada importància perquè va a definir la percepció i el caràcter de l'obra, va a determinar el comportament de l'edifici i va a produir un efecte directe sobre el medi ambient. De fet, "en un cicle de vida de 50 anys per a edificis convencionals, entre el 10 i el 20% del total de les emissions d'efecte hivernacle estaran associades amb els materials utilitzats. Tanmateix, en el cas d'edificis de baixa energia, on la càrrega relacionada a la calefacció és menor i l'ús de materials és major, aquesta proporció pot superar el 50%."⁴

Per tant, es conclou que el fet de perjudicar notablement l'entorn o de contribuir al progrés del disseny de l'arquitectura sostenible depén en gran mesura de les decisions dels arquitectes. És ací on rau la importància de l'elecció de materials.

3 Ibid.

4 BERGE, B. (2009). *The ecology of building materials*. Oxford: Architectural Press. <http://ecobooks.greenharmonyhome.com/wp-content/uploads/ecobooks/Ecology_of_Building_Materials_Second_Edition.pdf> [Consulta: 7 de març de 2016]



Canya, fusta i terra.
Fig.1 Campus i escola Green School Bali. PT Bamboo Pure.
Fig.2 Flake House. Olgga architectes.
Fig.3 Piscina Municipal del Toro. Vier Arquitectos.

2. LA SOSTENIBILITAT

En un món profundament afectat per crisis econòmiques cícliques, per una desigualtat social dramàtica i on els efectes del canvi climàtic s'intensifiquen dia a dia, sembla sensat recórrer als paràmetres de la sostenibilitat.

Però, què és la sostenibilitat? Són les característiques d'"aquell desenvolupament que permet satisfer les necessitats de les generacions presents, sense comprometre la capacitat de les futures generacions per a satisfer les seues pròpies necessitats."⁵

El principi de sostenibilitat global s'aconsegueix a tres àmbits: el mediambiental, l'econòmic i el social. Alguns dels objectius propis dels diversos àmbits són la protecció de la biodiversitat, la correcta gestió dels recursos i la reducció de la contaminació (mediambiental); l'eficiència del creixement i l'estabilitat (econòmic); i la reducció de la pobresa i el foment de la cultura (social). És a dir, cerca la sostenibilitat mediambiental, l'equilibri econòmic i la justícia social.⁶

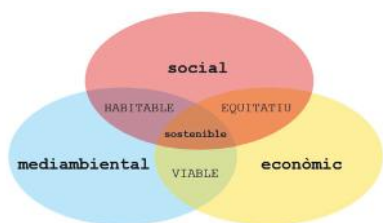


Fig.4 Enfocaments sobre el desenvolupament sostenible.

Com es pot observar a la figura, la interacció dels tres àmbits d'actuació té com a última finalitat aconseguir un sistema social-econòmic equitatiu, un econòmic-mediambiental viable, així com un social-mediambiental habitable.

Pel que fa a l'arquitectura, la sostenibilitat implica fer un ús racional dels recursos, és a dir, utilitzar els mínims recursos i la mínima energia possible. Així mateix, s'ha de preveure una generació ínfima de residus i garantir la seguretat i el confort dels usuaris durant la vida útil de l'obra en qüestió.

A l'hora d'avaluar la sostenibilitat d'un edifici s'ha de considerar la totalitat de la seua vida, des de l'extracció de materials fins a la generació de residus. Ací, cal destacar la importància de reciclar els materials emprats. El reciclatge, tant dels materials com del propi edifici, implica en molts casos un avantatge en termes econòmics, socials i mediambientals; en comparació a una primera producció. Pot disminuir els costos de producció i pot augmentar el valor econòmic del mateix element reciclat com a conseqüència del seu valor cultural. El fet de reciclar implica un treball intensiu que té com a resultat un increment dels llocs de treball.

5 World Commission on Environment and Development (1987).

6 LLORCA PONCE, A. (2011) Apunts *Economía medioambiental y desarrollo sostenible*. ETSAV.

Pel que fa als beneficis ambientals, amb el reciclatge es reduïxen els recursos requerits i la contaminació generada. No obstant, cal avaluar la capacitat de reduir el consum d'energia i material resultat del reciclatge d'un material o element en concret, perquè no tots els materials són potencialment reciclables. Un exemple és el cas del reciclatge del formigó com a àrid, on la mescla resultant necessita una major quantitat de ciment, la qual cosa repercuteix en un increment en l'ús d'energia.⁷

Convé destacar que a l'actualitat, es disposa de diferents certificacions que avaluen el comportament del conjunt d'un edifici basat en principis de sostenibilitat. Entre les més conegudes es troba la nord-americana *LEED*, i altres com la suïssa *eco-bau*, la britànica *BREEAM* i l'austríaca *TOTAL QUALITY*. A Espanya s'ha desenvolupat un certificat similar anomenat *VERDE*.

En definitiva, els objectius d'un desenvolupament sostenible de la indústria de la construcció es poden resumir en:

_Protecció de l'ecosistema i del medi natural. Inclou la protecció de

⁷ HEGGER, M. et al. (2006). *Construction materials manual*. Munich: Birkhäuser.

l'atmosfera (prevenció de l'efecte hivernacle i de la destrucció de la capa d'ozó) i la lluita contra la desforestació.

_Ús racional dels recursos naturals no renovables.

_Protecció de la salut. Se centra a garantir unes condicions climàtiques i d'higiene adequades als edificis.

_Protecció dels valors socials i de propietat pública. Lluita l'ús especulatiu d'àrees d'aigua i terra.

_Salvaguarda dels valors econòmics. Cerca estructures durables i no defectuoses, per evitar un consum de capital i de recursos innecessaris.⁸

Per tal d'aconseguir els objectius esmentats s'utilitzen una sèrie d'indicadors que descriuen les repercussions de les decisions constructives sobre el medi ambient i el confort dels usuaris. Per una banda es considera la demanda d'energia de l'edifici i el consum de materials, i per l'altra, la qualitat de l'ambient interior.

Finalment, s'utilitzen uns mètodes de càlcul d'energia total, consum material i qualitat del clima interior amb la finalitat de concloure quins són els valors recomanables.

⁸ Ibid.



Referents d'arquitectura sostenible: TYIN Tegnestue i Anna Heringer.

Fig.5,6 Centre de Formació Cassia Co-op. TYIN Tegnestue Architects.

Fig.7 Escola METI. Anna Heringer.

2.1. LA SOSTENIBILITAT AMBIENTAL

La sostenibilitat ambiental a l'arquitectura és un principi intrínsec al procés de projecte. Cada decisió, des del disseny més general fins al més detallat, deu cercar l'optimització dels recursos. Mitjançant el disseny arquitectònic es pot reduir el consum material amb plantes eficients i amb flexibilitat d'ús. Els principis d'il·luminació, aïllament i ventilació minimitzen l'impacte ambiental ja que redueixen la demanda energètica i milloren la qualitat de l'espai creat.

L'elecció de materials quantifica l'impacte generat sobre el medi ambient. L'ús de materials i productes locals suposa disminuir el transport necessari, a més a més, és recomanable emprar materials renovables, materials que inclouen materials reciclats (sempre i quan implique una millora energètica) i aquells amb possibilitat de ser reciclats.

Un mètode senzill i pràctic d'avaluar l'impacte ambiental d'un material és el conegut com a *Life Cycle Assessment* (LCA) o *Anàlisi de Cicle de Vida* (ACV). És una avaluació que comprén la totalitat de la vida útil d'un producte, inclou l'extracció de la matèria primera, la seua manufactura per tal d'obtindre el material processat, i finalment la seua

eliminació juntament amb el possible reciclatge. Engloba la totalitat de la vida útil perquè cada pas, des de la matèria primera fins al material de residu necessita una quantitat d'energia que queda emmagatzemada al producte o bé és alliberada a l'entorn. És interessant incloure l'ús del producte ja que els ACV mostren, com s'ha exposat prèviament, que més del 80% de les emissions de gasos hivernacle es produeixen durant la fase operativa de l'edifici.

L'objectiu final de l'ACV és aconseguir unes dades per tal d'avaluar l'impacte de diverses alternatives, comparar-les i justificar l'elecció raonadament.

L'ACV se centra principalment en les repercussions quantificables ambientals, encara que també considera les qualitatives, els costos de les alternatives i els aspectes socioculturals. Aquests últims promouen l'economia local, la integració del projecte al context arquitectònic i la satisfacció de les demandes arquitectòniques dels usuaris.



Fig.8 Anàlisi de Cicle de Vida amb inclusió de l'ús (ACV).

Els paràmetres que es tenen en compte per a les comparacions d'ACV són:

_Consum d'energia primària, PEI (MJ): També coneguda com a energia incorporada, és aquella quantitat d'energia necessària per a la producció i ús del material. Es dividix en energia primària renovable i no renovable.

_Potencial d'escalfament global, GWP (kg equivalents de CO₂): Fa referència a la retenció de gasos d'efecte hivernacle.

_Potencial de reducció d'ozó, ODP (kg equivalents de CCl₃F): Inclou aquells gasos destructors de la capa d'ozó, que és l'encarregada d'absorbir part de la radiació UV.

_Potencial d'acidificació, AP (kg equivalents de SO₂): La conversió de determinats contaminants aeris en àcids produïx que el valor del PH de les precipitacions es reduïska. Algunes conseqüències són la corrosió de metalls i la descomposició de pedres naturals.

_Potencial d'eutrofització, EP (kg equivalents de PO₄³⁻): Suposa una concentració excessiva de nutrients que a les aigües té efectes nocius per als éssers vius, i a la terra per a les plantes.

_Potencial fotoquímic de creació d'ozó, POCP (kg equivalents de C₂H₄): Aquesta formació d'ozó està vinculada a la causa de danys a la vegetació i als animals,

en concentracions elevades és tòxic per a les persones.

_Valor calorífic (MJ): És la quantitat d'energia alliberada durant la combustió d'un material.

_Durabilitat, potencial de reciclatge i ús específic.

Quan comparem elements han tindre una durabilitat equivalent. El potencial de reciclatge de les següents taules s'atribuïxen sols als metalls perquè en l'actualitat és el material amb major sistema de reciclatge.

Per altra banda, dins del efectes ambientals qualitatius es troben:

_El deteriorament o destrucció d'ecosistemes.

_La infraestructura necessària.

_El risc potencial de productes intermedis.

_La probabilitat de reutilització.

_El treball de supervisió necessari per a salvaguardar els processos industrials i l'abast de les etapes de processament industrial.⁹

⁹ HEGGER, M. et al. (2006). *Construction materials manual*. Munich: Birkhäuser.



Fig.9 Mercat i hotel a Yushara. Kengo Kuma & Associates.

Fig.10 Biblioteca Liyuan. Li Xiaodong Atelier.

Fig.11 Ecohotel Friend House. Ryntovt.

Una volta realitzada l'avaluació on es consideren les repercussions quantitatives i qualitatives sobre el medi ambient, es fa una comparació dels costos de les diferents alternatives. Es consideren els costos d'adquisició; una estimació del cost d'ús que inclou manteniment i reparacions; i finalment els costos d'eliminació o demolició. Per últim es tenen en consideració les repercussions de caràcter sociocultural. Encara que l'avaluació del cycle de vida prioritza els aspectes ecològics, es pot basar la decisió final en l'alternativa que en el seu conjunt siga més sostenible des d'un punt de vista ecològic, econòmic i social.

Es conclou que el LCA és un mètode d'avaluació que basa el seu anàlisi en la mesura de paràmetres com l'energia incorporada (EI) i el potencial d'escalfament global (GWP) dels elements de la construcció. Com s'exposa al llibre *The ecology of Building Materials*, "diversos estudis han indicat que l'energia incorporada als edificis convencionals pot ser reduïda del 15 al 20% elegint productes de baixa energia. Una comparació de bigues per al nou aeroport als afores d'Oslo mostra que l'energia total consumida en la fabricació de bigues d'acer és entre dos i tres voltes major que la fabricació de

bigues de fusta laminada."¹⁰

Aquestes dades argumenten l'avantatge d'utilitzar materials tradicionals, associats a una baixa energia incorporada. Una ràpida comparació de l'energia incorporada no renovable de diversos materials al llibre *Construction Materials Manual* mostra valors significativament inferiors per a materials tradicionals i locals, que per a aquells industrialitzats. Es calcula que l'energia incorporada no renovable d'1 m³ de terra compactada és de 158 MJ, i de la de fusta de pi local, 609 MJ; mentre que 1 m³ de formigó in situ comprén valors entre 1549 i 1764 MJ.

D'altra banda, en el cas concret d'un mur es poden comparar diversos valors d'EI no renovable que reforcen els beneficis d'utilitzar materials tradicionals respecte als materials més industrialitzats.

10 BERGE, B. (2009). *The ecology of building materials*. Oxford: Architectural Press.
<http://ecobooks.greenharmonyhome.com/wp-content/uploads/ecobooks/Ecology_of_Building_Materials_Second_Edition.pdf> [Consulta: 7 de març de 2016]

| Material, material specification data origin (see above) | Ref. unit | Calorific value [MJ] | PEI primary energy non-renew. [MJ] | PEI primary energy renew. [MJ] | GWP global warming [kg CO ₂ e] |
|---|------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---|
| Stone | | | | | |
| Granite* (India), polished, ρ = 2750 kg/m ³ | 1 m ³ | | 9837 | 332 | 626 |
| Sandstone (local), sawn, ρ = 2500 kg/m ³ | 1 m ³ | | 4099 | 153 | 253 |
| Slates* (local), ρ = 2700 kg/m ³ | 1 m ³ | | 4608 | 165 | 286 |
| Marble (Italy), polished, ρ = 2700 kg/m ³ | 1 m ³ | | 6749 | 249 | 422 |
| Loam | | | | | |
| Compacted loam*, ρ = 2200 kg/m ³ | 1 m ³ | | 158 | 1 | 9.7 |
| Loam bricks (sun-dried)*, ρ = 1200 kg/m ³ | 1 m ³ | | 1257 | 4 | 74 |
| Materials with mineral binders | | | | | |
| Mortars and screeds | | | | | |
| Anhydrite, comp. strength class 20, 2350 kg/m ³ | 1 m ³ | | 655 | 11 | 43 |
| Magnesia*, comp. strength class 20, 2000 kg/m ³ | 1 m ³ | | 2439 | 9.9 | 348 |
| Cement, comp. strength class 20, 2250 kg/m ³ | 1 m ³ | | 2161 | 27 | 389 |
| Gypsum, class (for render) P IV a, ρ = 1300 kg/m ³ | 1 m ³ | | 1477 | 9.6 | 177 |
| Lime-cement, class (for render) P II a, ρ = 1500 kg/m ³ | 1 m ³ | | 2675 | 28 | 448 |
| Masonry units | | | | | |
| Calcium silicate, ρ = 1800 kg/m ³ | 1 m ³ | | 2030 | 117 | 247 |
| Concrete (paving), ρ = 2500 kg/m ³ | 1 m ³ | | 1990 | 46 | 310 |
| Aerated concrete, ρ = 400 kg/m ³ | 1 m ³ | | 1484 | 81 | 186 |
| Lightweight concrete*, ρ = 600 kg/m ³ | 1 m ³ | | 787 | 35 | 97 |
| Concrete | | | | | |
| In situ concrete (C 25/30), ρ = 2340 kg/m ³ | 1 m ³ | | 1549 | 17 | 251 |
| In situ concrete (C 35/45), ρ = 2360 kg/m ³ | 1 m ³ | | 1764 | 23 | 320 |
| Precast concrete element, 2% steel (FE 360B, C 35/45), ρ = 2500 kg/m ³ | 1 m ³ | | 4098 | 86 | 455 |
| Material, material specification | | | | | |
| | Ref. unit | Calorific value [MJ] | PEI primary energy non-renew. [MJ] | PEI primary energy renew. [MJ] | GWP global warming [kg CO ₂ e] |
| Ceramic materials | | | | | |
| Vert. perforated clay bricks, external wall, ρ = 670 kg/m ³ | 1 m ² | | 1485 | 638 | 95 |
| Clay bricks, internal wall, ρ = 750 kg/m ³ | 1 m ² | | 1663 | 715 | 107 |
| Solid engineering bricks (KMz), ρ = 1600 kg/m ³ | 1 m ² | | 4776 | 39 | 301 |
| Glazed stoneware*, ρ = 2000 kg/m ³ | 1 m ² | | 6322 | 0.060 | 393 |
| Unglazed stoneware*, ρ = 2000 kg/m ³ | 1 m ² | | 7160 | 0.070 | 445 |
| Bituminous materials | | | | | |
| Pure straight-run bitumen* (B100-B70) | 1 kg | | 45.6 | 0.010 | 0.37 |
| Polymer-modified bitumen (PmB 65A) | 1 kg | | 35.3 | 0.020 | 0.50 |
| Wood and wood-based products | | | | | |
| Sawn timber | | | | | |
| Pine, 12% MC* (local), ODD 450 kg/m ³ | 1 m ³ | 8775 | 609 | 9512 | -792 ¹ |
| Western red cedar, 12% MC (N. Am.), ODD** 630 kg/m ³ | 1 m ³ | 12285 | 4485 | 14359 | -907 ¹ |
| Teak, 12% MC (Brazil), ODD 660 kg/m ³ | 1 m ³ | 12870 | 3217 | 13435 | -1013 ¹ |
| Wood-based products | | | | | |
| Glued laminated timber, 12% MC, ODD 465 kg/m ³ | 1 m ³ | 9300 | 3578 | 13870 | -662 ¹ |
| 3-ply core plywood, 12% MC, ODD 430 kg/m ³ | 1 m ² | 8618 | 2617 | 9387 | -648 ¹ |
| Veneer plywood (BFU), 5% MC, ODD 490 kg/m ³ | 1 m ² | 10175 | 4729 | 15041 | -636 ¹ |
| Particleboard (P5, V100), 8.5% MC, ODD 690 kg/m ³ | 1 m ² | 13998 | 5818 | 12614 | -821 ¹ |
| Oriented strand bd. (OSB), 4% MC, ODD 620 kg/m ³ | 1 m ² | 12555 | 4593 | 16479 | -839 ¹ |
| Med. density fibred. (MDF)*, 7.5% MC, ODD 725 kg/m ³ | 1 m ² | 15843 | 9767 | 12495 | -515 ¹ |
| Metals | | | | | |
| Ferrous metals | | | | | |
| Cast iron*, casting (GG20; secondary), G.J.L | 1 kg | | 10 | 0.49 | 0.97 |
| Structural steel, hot-rolled section (FE 360B) | 1 kg | | 24 | 0.54 | 1.7 |
| Steel mesh as concrete reinforcement (secondary) | 1 kg | | 13 | 0.24 | 0.83 |
| Weathering steel, cold-rolled strip (WT St 37-2), 2 mm | 1 kg | | 26 | 0.56 | 2.0 |
| Stainless steel (V2A, X 5 CrNi 18-10), 2 mm | 1 kg | | 54 | 6.3 | 4.8 |
| Non-ferrous metals | | | | | |
| Alum. alloy (EN AW-7022 [AlZn5Mg3Cu]), sheet, 2 mm | 1 kg | | 271 | 38 | 22 |
| Lead*, sheet, 2 mm | 1 kg | | 34 | 1.9 | 2.3 |
| Titanium-zinc (pure Zn Z1, 0.003% Ti), sheet, 2 mm | 1 kg | | 45 | 3.8 | 2.6 |
| Copper*, sheet, 2 mm | 1 kg | | 37 | 4.6 | 2.5 |

| Layers * for origin of data see "Life cycle assessments", p. 100 | PEI primary energy non-renewable [MJ] | PEI primary energy renewable [MJ] | GWP global warming [kg CO ₂ e] | ODP ozone depletion [kg R11e] | AP acidification [kg SO ₂ e] | EP eutrophication [kg PO ₄ e] | PCP summer smog [kg C ₂ H ₄ e] |
|---|---------------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|---|--|--|
| Solid walls | | | | | | | |
| Solid homogeneous walls | | | | | | | |
| reinforced concrete | 660 | 83 | 46 | 0.000010 | 0.21 | 0.033 | 0.010 |
| reinforced concrete (grade C 25/35), 2% steel content (FE 360 B), 200 mm | | | | | | | |
| Solid modular walls | | | | | | | |
| loam bricks* | 95 | 1.2 | 4.2 | 0 | 0.012 | 0.0011 | 0.0010 |
| air-dried loam bricks, ρ = 1400 kg/m ³ , 240 mm loam mortar | | | | | | | |
| aerated concrete bricks | 419 | 14 | 65 | 0 | 0.25 | 0.018 | 0.019 |
| aerated concrete bricks (PPW 4-0.6 NuF), 240 mm masonry mortar, MG II | | | | | | | |
| lightweight concrete bricks with zircon aggregate | | 247 | 5.1 | 26 | 0 | 0.062 | 0.0076 |
| - with perlite aggregate (VBL 2), 240 mm masonry mortar, MG II | | | | | | | |
| calcium silicate bricks | 517 | 14 | 66 | 0 | 0.13 | 0.014 | 0.030 |
| calcium silicate bricks (KSL 121.4), 240 mm masonry mortar, MG II | | | | | | | |
| gypsum wallboard | 188 | 2.5 | 8.9 | 0 | 0.037 | 0.0036 | 0.0030 |
| gypsum wallboard, 100 mm gypsum mortar, MG IV | | | | | | | |
| vertically perforated clay bricks | 599 | 12 | 79 | 0 | 0.15 | 0.0072 | 0.011 |
| vertically perforated clay bricks (hLz 121.2), 240 mm masonry mortar, MG II | | | | | | | |
| Stud walls | | | | | | | |
| timber stud wall | 182 | 179 | -5.9 | 0 | 0.064 | 0.0076 | 0.013 |
| plasterboard (type A), 12.5 mm timber studs, 80 x 40 mm mineral wool, 40 mm plasterboard (type A), 12.5 mm | | | | | | | |
| Wall and soffit linings | | | | | | | |
| Layers * for origin of data see "Life cycle assessments", p. 100 | PEI primary energy non-renewable [MJ] | PEI primary energy renewable [MJ] | GWP global warming [kg CO ₂ e] | ODP ozone depletion [kg R11e] | AP acidification [kg SO ₂ e] | EP eutrophication [kg PO ₄ e] | PCP summer smog [kg C ₂ H ₄ e] |
| Mineral linings | | | | | | | |
| plasterboard* | 97 | 50 | 1.2 | 0 | 0.030 | 0.0034 | 0.0060 |
| plasterboard (type A), 12.5 mm screw fixings, edge detail with softwood battens | | | | | | | |
| loam building board | 94 | 2.0 | -0.2 | 0 | 0.002 | 0.0028 | 0.0030 |
| fine loam plaster, jute fabric, 4 mm loam building board, 20 mm timber framework, screwed, 24 mm glass wall | | | | | | | |
| 239 | 3.8 | 9.9 | 0 | 0.034 | 0.0030 | 0.0040 | |
| - tough, safety glass, sound insulation class SSK 3), 8 mm acrylic parts | | | | | | | |
| Timber linings | | | | | | | |
| timber boards | 40 | 281 | -26 | 0 | 0.010 | 0.0018 | 0.0050 |
| timber boards (spruce, 18g, 19.5 mm, screwed) | | | | | | | |
| 177 | 540 | 93 | 0 | 0.060 | 0.0069 | 0.030 | |
| veneer plywood, 22 mm, screwed | | | | | | | |
| oriented strand board* | 40 | 67 | -9.7 | 0.000016 | 0.019 | 0.0018 | 0.0020 |
| OSB, 19 mm, screwed | | | | | | | |
| 40 | 67 | -9.7 | 0 | 0.018 | 0.0018 | 0.0020 | |
| particleboard* | | | | | | | |
| particleboard P1, 19 mm, screwed | | | | | | | |

Fig.12,13 Valors principals d'avaluació del cicle de vida dels materials utilitzats per a materials de construcció.

Fig.14 Dades d'avaluació de cicle de vida per a revestiment de parets externes.

2.2. LA SOSTENIBILITAT ECONÒMICA

"Anomene a una cosa immoral o lletja, destructora de l'ànima o degradant de la condició humana, un perill per a la pau del món o un atemptat al benestar de les futures generacions, que si no ha demostrat que és *antieconòmica* no haurà qüestionat en res el seu dret a existir, créixer i prosperar".

"El desenvolupament econòmic és alguna cosa molt més àmplia i molt més profunda que l'economia, i no diguem l'econometria. Les seues arrels s'estenen més enllà de l'esfera econòmica, en l'educació, l'organització, la disciplina i, per damunt de tot, en la independència política i en una consciència nacional de confiança en les pròpies forces."

E.F.S, *Small is beautiful*.

Cal preguntar-se quins són els criteris per elegir un material de construcció enlloc d'un altre. Sobretot, quan moltes vegades es fa ús de materials més contaminants (ja siga pel sistema de producció o pel seu transport) en perjudici d'aquells materials més pròxims i més sostenibles.

Ens trobem en el cas d'una de les diverses fallides del mercat. Els béns ambientals no tenen un sistema de drets de propietat completament determinat, és a dir, els privilegis i les obligacions dels propietaris no estan correctament definides. Açò és conseqüència del seu caràcter de béns comuns i fa que queden al marge del procés d'assignació dels recursos econòmics, infravalorats i amb el perill de la seua espoliació i extinció.¹¹

L'oferta d'un determinat material de construcció és funció dels costos de la seua producció, que estan relacionats amb els preus dels factors i de les matèries primeres. La fallida del mercat es troba en no considerar les externalitats negatives d'un determinat producte, és a dir, els costos que no són pagats pels productors sinó que repercutixen sobre tota la societat, com és el cas

¹¹ LLORCA PONCE, A. (2011) Apunts *Economía medioambiental y desarrollo sostenible*. ETSAV.

de la contaminació i el deteriorament ambiental. Actualment, la societat es regix pel sistema de l'oferta i la demanda, on el principal indicador és el preu, per tant, una empresa elegirà abans un producte contaminant barat que un producte sostenible car. A la *figura 15a* s'observa l'equilibri de mercat, que és el punt on coincidix la quantitat que està disposada a adquirir el comprador i la que està disposada a vendre el venedor a un preu determinat.

Existixen diversos mètodes per solucionar aquesta situació. La primera és tindre en compte les repercussions sobre el medi ambient (externalitats negatives) mitjançant impostos. Un impost sobre la producció (*figura 15b*) d'aquells productes més contaminants i menys respectuosos amb els recursos naturals, tracta de representar el cost social derivat de la contaminació, i permet reduir la seua producció i augmentar el seu preu. Així, part del consum d'aquest bé es desplaçaria cap a béns substitutius.

A la *figura 15b* s'observa que es corregix la corba de l'oferta i a la nova situació d'equilibri es ven una quantitat (q_t) inferior a la quantitat venuda abans d'aplicar l'impost (q^*). El preu que han de pagar els consumidors (p_c) també

és major al preu previ a l'impost (p^*), i els ingressos del venedor (p_v) són inferiors, ja que al preu que paguen els compradors se li ha de descomptar l'impost.¹²

També es poden aplicar impostos sobre el consum, que com en el cas anterior, tenen com a objectiu influir en l'assignació dels recursos per tal de millorar el benestar i aconseguir una adjudicació més eficient.

Un altra solució consisteix a subvencionar la producció de materials menys contaminants (figura 15c). D'aquesta manera, augmenta el preu que percep el venedor, disminueix el preu que paga el comprador i augmenta la quantitat intercanviada.

En resum, el mètode de producció basat en el mercat, elegix aquell mètode de menor cost privat, és a dir, el suportat per l'empresa. En el cas d'externalitats negatives, el preu deixa de ser l'indicador per establir què i com produir, i cal recórrer a impostos i subvencions per garantir el màxim benestar de la societat.¹³

12 LLORCA PONCE, A. (2011) Apunts *Economía medioambiental y desarrollo sostenible*. ETSAV.

13 Ibid.

Cal esmentar que la correcció de l'assignació de recursos entra en conflicte amb els principis d'economia clàssica que defensen que el sistema econòmic és plenament capaç d'assolir l'assignació òptima de recursos. En canvi, els teòrics de l'economia mediambiental conceben l'economia com a part d'un subsistema major, el medi ambient, que és finit. I admeten que l'economia en si mateixa no assegura el correcte ús dels recursos ni preveu l'esgotament d'aquests.¹⁴

Les subvencions i impostos explicats prèviament podrien considerar-se accions polítiques correctores del sistema de mercat. No obstant, cal puntualitzar que no totes tenen les mateixes connotacions. La venda d'un producte contaminant es deu corregir amb sancions sobre la producció mateixa perquè aquesta es reduïska o desaparega. En canvi, si els impostos s'apliquen al consumidor, fins que s'assolisca el nou estat d'equilibri de mercat, el producte contaminant va a continuar produint-se. Respecte a les subvencions dels productes menys contaminants, serien innecessàries si

14 LILLO NAVARRO, M. (2015). *Sin recursos: el paradigma de la escasez como principio creativo en el proyecto arquitectónico*. Tesis doctoral no publicada. Universitat Politècnica de València, <<http://hdl.handle.net/10251/59226>> [Consulta: 11 de febrer de 2016]

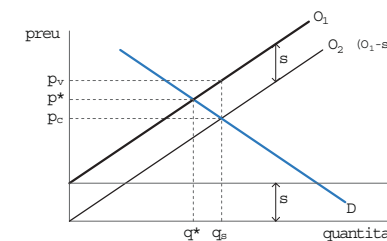
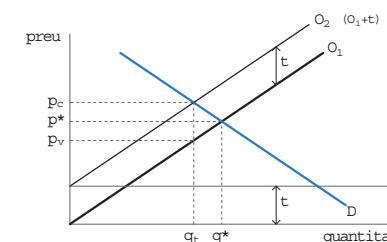
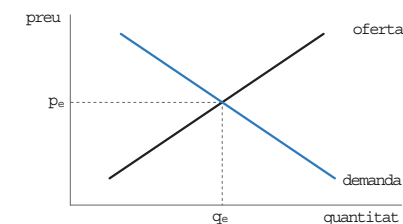


Fig.15a Equilibri de mercat.

Fig.15b Impost sobre la producció.

Fig.15c Subvenció de productes menys contaminants.



els productes nocius no es produïren en primer lloc. Així mateix, els economistes argumenten que un sistema que necessita ser subvencionat, a llarg termini no funciona perquè finalment es manté la producció pel fet que l'Estat els paga per ella.

En referència als materials tradicionals, o low-tech, trobem que s'utilitzen en limitades ocasions, i una de les justificacions és el preu. És cert que al tractar-se de materials més senzills tenen un preu d'adquisició barat. Tanmateix, són materials de treball intensiu que necessiten d'una posada en obra laboriosa, i açò implica una despesa econòmica important. En un mercat amb materials obtinguts per processos mecànics que limiten el treball humà, s'obtenen preus d'adquisició molt reduïts, el que implica una predilecció cap a aquests materials malgrat requerir llargs desplaçaments o ser menys sostenibles.

Però per què la mà d'obra es considera costosa i el material industrial barat? La mà d'obra duu associades unes condicions de treball regulades per la legislació del país on es produïx. No obstant, si es canvia el factor humà per una màquina, malgrat necessitar una

major inversió energètica i produir més contaminació, s'abaratix el producte. A més a més, si es desplaça la indústria a un país on les legislacions laborals són menys humanes, els salaris reduïts suposen un producte més barat que arriba a compensar els desplaçaments necessaris. És així com el producte contaminant aconseguix un preu més competitiu, perquè no reflectix les externalitats negatives que genera la seua producció sobre el medi ambient i la societat.

En conclusió, la solució per promoure els materials low-tech des d'una perspectiva econòmica sembla exigir subvencions cap a aquests materials o majors impostos als materials estrangers. És necessari reflectir el preu real del producte. D'aquesta manera, el preu sí seria indicador del producte òptim, ja que els béns contaminants serien més cars que els més sostenibles. Així, els sistemes produïts de forma local, amb mitjans de producció propers i sostenibles es vorien afavorits i promocionats.¹⁵

Fig.16,17,18 Foment del treball local.

15 LILLO NAVARRO, M. (2015). *Sin recursos: el paradigma de la escasez como principio creativo en el proyecto arquitectónico*. Tesis doctoral no publicada. Universitat Politècnica de València, <<http://hdl.handle.net/10251/59226>> [Consulta: 11 de febrer de 2016]

2.3. LA SOSTENIBILITAT SOCIAL

"El que necessitem són optimistes que estiguen totalment convençuts que la catàstrofe és certament inevitable llevat que ens recordem de nosaltres mateixos, que recordem qui som: una gent peculiar destinada a gaudir de salut, bellesa i permanència; dotada d'enormes dots creatius i capaça de desenvolupar un sistema econòmic tal que la gent estiga en el primer lloc i la provisió de mercaderies en el segon. La provisió de mercaderies, sense dubte, es cuidarà aleshores d'ella mateixa. Açò costarà molt treball mitjançant tasques noves, experimentals i plaents. La gent optimista de la que parlem, no obstant, no ha temut mai el treball."
E.F.S, *Small is beautiful*.

Finalment, el tercer pilar sobre el que es fonamenta la sostenibilitat és el social. Tracta de promoure els valors de la naturalesa i aconseguir una societat justa i equitativa a nivell econòmic i social. La societat cerca optimitzar la seua qualitat de vida basada en els valors de l'educació, la cultura i l'oci.

La societat capitalista en la que ens trobem basa els seus avanços en la ciència, la indústria i els beneficis. L'obsessió per la reducció dels costos ens ha conduït a un món progressivament més mecanitzat que tracta de minimitzar el factor humà per considerar-lo imperfecte, lent i car.

A Europa, a partir dels anys 70 pren força un moviment que torna a replantejar la relació entre la tecnologia i l'ésser humà. Entre els seus principals exponents es troba E.F. Schumacher i el seu llibre *Small is beautiful*, on exposa com la fixació pel creixement econòmic ha fet, i continua fent, un mal ús dels recursos naturals i humans. Lluny d'una economia i una producció global, proposa recuperar l'escala humana de la producció.

Un sistema on l'individu creix gràcies al treball i on el treball local és la ferramenta per aconseguir un ús adequat dels recursos naturals i humans.

Per tal d'aconseguir una *economia de la permanència*¹⁶, Schumacher planteja una nova orientació de la ciència i la tecnologia fonamentada sobre l'accessibilitat econòmica, l'escala humana i la creativitat.

La finalitat d'aquestes tres bases inclou la garantia del principi d'igualtat d'oportunitats i, consegüentment, el foment de l'autogestió i el desenvolupament local.

Finalment, mitjançant la creativitat es cerca un treball que beneficie el cos i l'ànima humana, en contraposició al treball mecànic, monòton i sense sentit.

I quin és el paper que tenen els materials low-tech en aquests arguments? L'ús de materials tradicionals en funció dels recursos locals o pròxims té com a resultat nombrosos avantatges des d'un punt de vista social.

_Els mètodes i equips necessaris per obtindre aquestos materials es troben dins dels que Schumacher considera com a suficientment barats per garantir la seua accessibilitat. Són els materials amb els quals s'ha construït de forma

16 SCHUMACHER, E.F. (2001). *Lo pequeño es hermoso*. Madrid: Tres cantos

tradicional, no necessiten mètodes de producció altament industrialitzats o científics, com podria tractar-se a la producció de plàstics, formigó o metalls. Construir amb palla, terra o fusta implica construir amb els materials característics de la zona. Hi ha, per tant, una gran facilitat per accedir als materials. A més a més, no es requereix una gran inversió per manufacturar-los i els equips usats són fàcils de mantindre i reparar.

Així mateix, al tractar-se de materials locals, cal destacar que són un incentiu per a l'economia de la zona. Fomenten el treball local, de forma que augmenta l'ocupació i la renda dels treballadors pròxims, el que suposa una millora de la qualitat de vida local i una forma d'evitar l'èxode rural per manca d'oportunitats.

_L'escala fa referència a l'impacte sobre l'entorn. El caràcter local dels materials low-tech significa una reducció de les importacions de materials i, consegüentment, dels desplaçaments corresponents que generen un deteriorament considerable del medi ambient.

La xicoteta escala busca la simplicitat i la no violència. El fet de ser productes basats en fonts de recursos locals que responen a necessitats locals eviten la dependència a nivell global, la major repercussió de les crisis i les abundants importacions i exportacions.

_Per últim, els materials tradicionals són el resultat d'una producció menys mecanitzada i autòmat, un poc més humana i artesanal. No es tracta de materials obtinguts per una inversió important de capital, sinó de treball intensiu. Fomenten el treball manual i la creativitat, són productes fets amb les mans i el cervell.

Amés d'això, el fet d'utilitzar materials de la zona suposa un valor sociocultural. Per una banda, genera una arquitectura contemporània però respectuosa amb el caràcter i els valors de l'emplaçament. I per l'altra, a l'estar proporcionada per treballadors locals, genera un vincle amb l'obra basada en una major participació ciutadana. En definitiva, representen la protecció de la cultura i el patrimoni arquitectònic.



Fig.19,20,21 Escola Nueva Esperanza. Al Borde.

En resum, el camí per aconseguir la meta de la sostenibilitat queda sintetitzat en la següent cita del capítol *Una tecnologia amb rostre humà* del llibre de Schumacher:

"Com diguera Gandhi, els pobres del món no poden ser ajudats per la producció en massa, sinó sols per la producció feta per les masses. (...) La tecnologia de la *producció massiva* es inherentment violenta, ecològicament danyosa, autodestructiva en termes de recursos no renovables i embrutidora per a la persona humana. La tecnologia de la *producció per les masses*, fent ús del millor del coneixement i experiència moderns, conduïx a la descentralització, és compatible amb les lleis de l'ecologia, és cuidadosa en el seu ús dels recursos escassos i s'adapta per a servir a la persona humana enlloc de fer-la servidora de les màquines. Jo l'he denominat *tecnologia intermèdia* per a donar a entendre que es molt superior a la tecnologia primitiva d'èpoques passades però al mateix temps molt més simple, més barata i més lliure que la súper tecnologia dels rics."¹⁷

Aquesta cerca d'una tecnologia més simple, en el nostre cas dels sistemes de producció de materials més tradicionals, suposa un major esforç que continuar avançant cap a materials més complexos i científics. Requerix una major reflexió i la capacitat de reinventar l'arquitectura tradicional en un món contemporani.

17 SCHUMACHER, E.F. (2001). *Lo pequeño es hermoso*. Madrid: Tres cantos

3. REFLEXIÓ

Després d'un estudi dels paràmetres de sostenibilitat aplicables als materials de construcció, es pot concloure que l'ús de materials tradicionals està justificat per les seues repercussions ecològiques, econòmiques i socials. A manera de resum, la construcció amb fusta, cartró, canya i fibres vegetals, atovó, BTC i tàpia implica un ús de materials locals, renovables i amb una baixa energia incorporada. Les conseqüències directes són una menor contaminació, tant per la reducció del transport necessari com per l'energia utilitzada.

Econòmicament, s'ha explicat el motiu del seu preu final més elevat i la necessitat de corregir el mercat per garantir un preu real dels productes. No obstant això, cal destacar la influència sobre la promoció de l'economia local.

Per últim, el factor social inclou una vinculació més profunda amb l'arquitectura local, pel que fa a la tradició constructiva i la relació de la societat amb la seua arquitectura. A més a més, la construcció local és incentiu d'una millora de les condicions laborals.

Tanmateix, l'anàlisi dels exemples presents d'arquitectura low-tech residencial en general, i d'arquitectura de terra en particular, mostra diversos

problemes per ratificar la seua sostenibilitat. Per una banda, manifesta un predomini d'arquitectura de xicoteta escala que té com a resultat un urbanisme dispers o *urban sprawl*¹⁸; per l'altra banda, s'observa una manca de normativa relacionada a la construcció amb terra.

Primerament, la dispersió o fragmentació urbana té una sèrie de connotacions negatives relacionades amb la sostenibilitat. Es caracteritza per residències majoritàriament unifamiliars envoltades d'espais verds privats. Es tracta de zones de baixa densitat de població allunyades de les ciutats, consegüentment, demanden un major ús del vehicle privat per als desplaçaments quotidians. L'augment del trànsit de cotxes suposa una major contaminació, així com un major risc d'accidents i un menor desplaçament a peu o en bicicleta que repercutixen negativament sobre la salut dels habitants.¹⁹

La fragmentació urbana deriva en un elevat ús del sòl i de les infraestructures, i implica el risc de disminució de capital natural. Un clar exemple es pot observar en la comparació realitzada per Teddy

18 WIKIPEDIA <https://en.wikipedia.org/wiki/Urban_sprawl> [Consulta: 17 de maig de 2016]

19 Ibid.

Cruz entre dos ciutats frontereres, Mèxic i San Diego. Ambdós ciutats tenen una població similar, estimada al voltant d'1,3 milions en 2010. Tanmateix, San Diego ha crescut sis voltes més que Tijuana en les últimes dècades.²⁰

No obstant, s'admet que l'urbanisme dispers genera normalment zones residencials amb una major qualitat de vida a nivell individual. Gaudixen de major tranquil·litat, d'una situació idíl·lica i de residències de major tamany. Per contra, la qualitat de vida a nivell col·lectiu es veu seriosament perjudicada. Hi ha una menor interacció social degut a l'aïllament d'urbanitzacions que acaben convertint-se en ciutats dormitori.

D'acord amb el Marc d'actuació per al desenvolupament urbà sostenible en la Unió Europea (COM 1998-605) "cal promoure models urbans que aconseguisquen un ús eficient dels recursos, limitant la dispersió i l'ús indiscriminat del sòl".²¹

20 TED. <https://www.ted.com/talks/teddy_cruz_how_architectural_innovations_migrate_across_borders> [Consulta: 17 de maig de 2016]

21 *Criterios de sostenibilidad aplicables al planeamiento urbano.* <<http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0528797.pdf>> [Consulta: 17 de maig de 2016]

Cal cercar, per tant, un model d'urbanització raonablement compacte. S'han d'evitar densitats excessives que generen usos indiscriminats dels recursos, juntament amb problemes de relació social i d'higiene. L'objectiu és una densitat mitjana i una mescla d'usos que beneficie la reducció dels desplaçaments. Els equipaments, els espais públics i verds requereixen d'una distribució equitativa en el projecte urbanístic per evitar una dependència del transport privat. Paral·lelament, cal dissenyar una infraestructura que prioritze el transport públic i que fomenti els desplaçaments a peu i amb bicicleta.

En contraposició a la dispersió urbana, una major densitat residencial és indirectament proporcional a l'ocupació del sòl; i una major densitat d'usos és intrínseca a una reducció dels desplaçaments i a un increment de la qualitat de l'espai urbà.

L'urbanisme sostenible també deu comprendre uns criteris en relació amb els materials de construcció. En primer lloc cal considerar l'energia incorporada dels materials durant la seua selecció i continuar amb un disseny arquitectònic eficient.

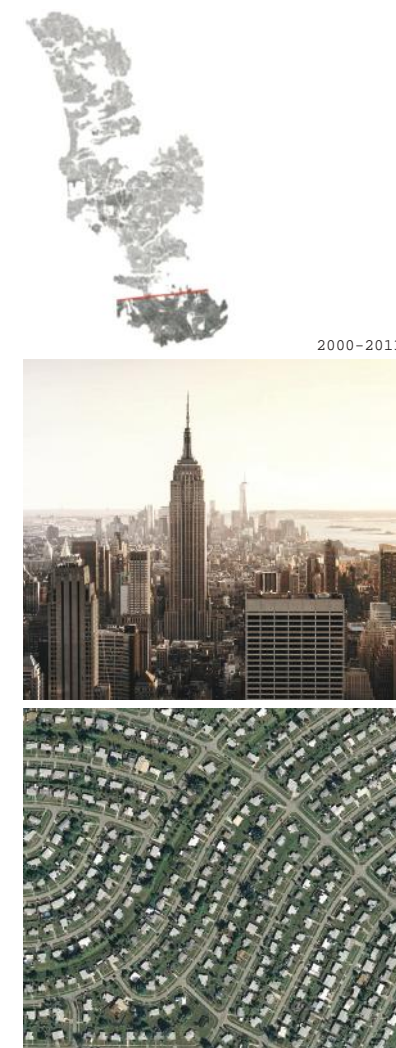


Fig.22 Creixement territorial de les ciutats de San Diego i Tijuana.

Fig.23,24 Comparació de la densitat de la ciutat de Nova York i d'un conjunt residencial de dispersió urbana.



Fig.25 La Gran Muralla Xinesa.

Fig.26 Ksar d'Aït-Ben-Haddou, Marroc. Patrimoni de la Humanitat des de 1987.

Fig.27 Edifici més alt de terra d'Alemanya (1836).

Un altre factor d'importància és la proximitat dels materials per tal de reduir el transport i promoure el desenvolupament local. També cal considerar la durabilitat que els materials garanteixen a l'edificació i aspectes de reciclatge dels materials, és a dir, la possibilitat de ser reciclats o d'utilitzar materials reciclats.²²

Així doncs, es pot concloure que cal estudiar el creixement en altura de les edificacions residencials de terra per avançar cap a una densitat moderada. Existixen diversos precedents que reforcen la viabilitat d'aquesta possibilitat. Ciutats senceres com Aït-Ben-Haddou foren construïdes amb aquest material. A més a més, construccions tan excepcionals com la Gran Muralla Xinesa utilitzaren la terra compactada en gran mesura. No obstant, posteriorment va ser recoberta amb pedra i rajola. Fins i tot a Europa hi ha exemples de construccions amb terra que superen les 5 altures.

Segonament, a més del problema de la densificació, la terra mostra una falta de normativa que retarda la normalització

22 *Criterios de sostenibilidad aplicables al planeamiento urbano.* <<http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0528797.pdf>> [Consulta: 17 de maig de 2016]

de la seua aplicació.

Segons F.Font i P.Hidalgo "la terra, tal i com ocorre des de fa segles, és un material que novament comença a formar part de la vida real, la que respira, però que en moltes ocasions sucumbix davant de les exigències legals, a pesar del model de bondats que aquest material oferix: el seu caràcter saludable i inofensiu per a l'ocupant de l'habitatge, la seua àmplia disponibilitat, el seu excel·lent comportament tèrmic, la seua indiscutible adaptació al paisatge, les seues possibilitats formals i estètiques de gran força visual, o la seua reciclabilitat, són solament algunes d'elles."²³

La terra disposa d'assaigs i normes per determinar les seues característiques però, a Espanya hi ha una falta clara de normativa, que fins 2008 no va mostrar cap avanç. En aquest any apareix la norma *UNE 41410:2008. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques*. Segons Font i Hidalgo, sembla que el Ministeri d'Habitatge considera la introducció de la terra i les seues tècniques tradicionals al CTE. A més a d'estar elaborant la norma UNE sobre la tàpia.²⁴

23 FONT, F. i HIDALGO, P. (2011). "La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos" a *Informes de la Construcción*, vol. 63, 523, 21-34.

24 Ibid.

4. MARTIN RAUCH I LA CASA RAUCH



Fig.28 Martin Rauch.
Fig.29 Casa Rauch.

Un dels màxims referents de l'arquitectura contemporània amb terra és Martin Rauch. El seu interès per aquest material està vinculat als seus estudis relacionats amb la ceràmica. Però, és durant la seua experiència com a voluntari a Àfrica, quan els seus principis artístics sofririen un punt d'inflexió. Observa el contrast entre els mètodes constructius més primitius i la pressió exercida pel model del primer món, la dependència creada per sistemes tecnològics més complexos i ecològicament menys sostenibles.

Els seus principis d'art *povera* i modelatge d'argila evolucionen cap a un interès de construir amb terra, que tenen com a resultat el seu diploma *Loam Clay Earth* presentat a la Universitat d'Arts Aplicades de Viena (1983).

L'obra de Rauch naix de l'experimentació del potencial de la terra com a material constructiu, estructural i d'acabat. En 1999 funda l'estudi *Lehm Ton Erde*, la filosofia del qual es basa en les paraules *Loam, Clay, Earth* (Marga, Argila, Terra). Representen l'artesanía i la tecnologia, el disseny artístic i la sostenibilitat de l'arquitectura de terra.²⁵

25 LEHM TON ERDE <<http://www.lehmtonerde.at/en/martin-rauch/>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Martin Rauch redefinix el concepte d'arquitectura de terra. Prova la validesa contemporània del material i explota les seues característiques pures, sense afegits ni recobriments.

El manifest de la seua obra queda exemplificat a la *Casa Rauch* (2008). Aquest projecte residencial està situat a una parcel·la de pendent pronunciada a la localitat de Schlins (Àustria). És el producte de la col·laboració del constructor Martin Rauch i l'arquitecte Roger Boltshauser, de la conjunció de la tècnica del material i la poesia arquitectònica.

Es tracta d'un sòlid massís perforat per dos terrasses, una a est i l'altra a oest. Destaca la modulació horitzontal marcada per les rajoles d'argila cuita, emfatitzada per l'horitzontalitat de les finestres. Aquestes rajoles compleixen una funció estètica i funcional, ja que reduïxen l'erosió de la pluja sobre els murs de terra. Tant la morfologia com el material responen al caràcter de l'entorn, donant l'aparença d'una estructura que emergix de la terra.

Aquesta obra és d'especial interès pel seu plantejament de sostenibilitat global, per la seua precisió constructiva i la seua bellesa arquitectònica.

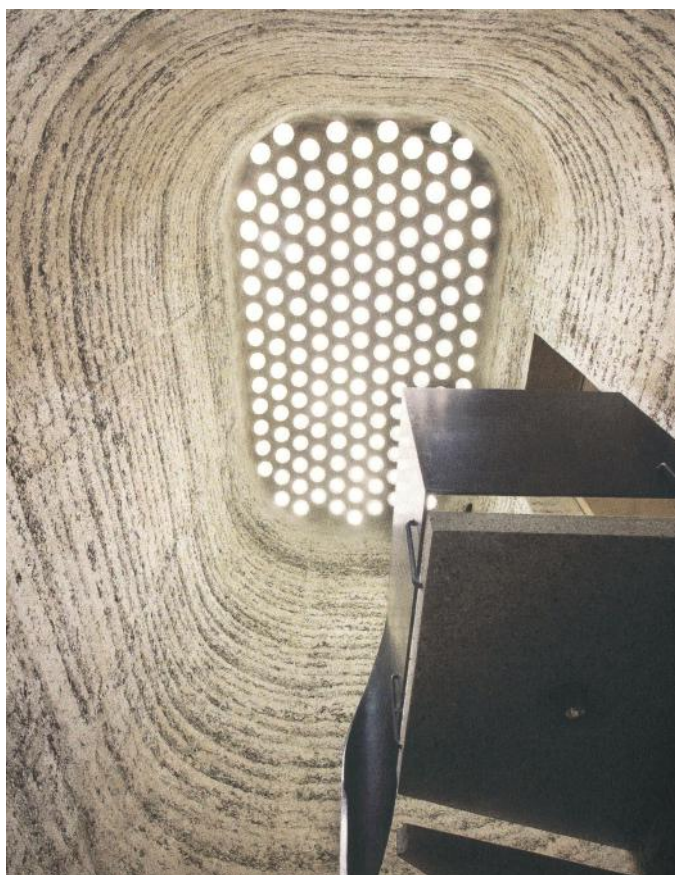
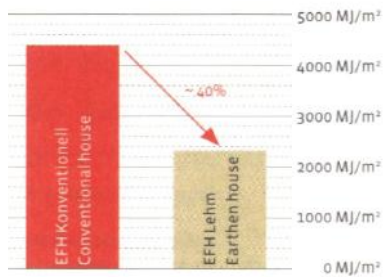


Fig.30,31 Vistes interiors de l'escala principal.



| Konventionell / Conventional | |
|--|--|
| Außenwand oberhalb Terrain / Exterior wall above-grade | |
| 22 cm | Stahlbeton 2.400 kg/m³ / Reinforced concrete 2,400 kg/m³ |
| 10 cm | Steinwollisolation 40 kg/m³ / Weißputz / Gypsum plaster |
| Außenwand unterhalb Terrain / Exterior wall below-grade | |
| 22 cm | Stahlbeton 2.400 kg/m³ (2% Armierung) / Reinforced concrete 2,400 kg/m³ (2% reinforcing) |
| 10 cm | EPS 40 kg/m³ |
| Dach / Roof | |
| 22 cm | Stahlbeton 2.400 kg/m³ / Reinforced concrete 2,400 kg/m³ |
| | Dampfsperre / Vapor barrier |
| 10 cm | Wärmedämmung EPS / EPS thermal insulation |
| | Bitumenbahn / Bitumen sheeting |
| 5 cm | Kiesbett / Gravel bed |
| 3 cm | Platten/Ziegel / Roofing slabs/tiles |
| Stampflehm / Rammed earth | |
| Außenwand oberhalb Terrain / Exterior wall above-grade | |
| 45 cm | Stampflehm 1.800 kg/m³ / Rammed earth 1,800 kg/m³ |
| 10 cm | Schilfmatte / Reed mat |
| 3 cm | Lehmputz / Earth plaster |
| Außenwand unterhalb Terrain / Exterior wall below-grade | |
| 45 cm | Stampflehm 1.800 kg/m³ / Rammed earth 1,800 kg/m³ |
| 10 cm | Schaumglas / Foam glass |
| Dach / Roof | |
| 3 cm | Lehmbauplatte / Lehmputz / Clay building panels/earth plaster |
| 24 cm | Doppelbaumdecke / Timber beams |
| 20 cm | Schilfmatte / Reed mat |
| | 3-Schichtplatte / Three-ply panel |
| | Bitumenbahn / Bitumen sheeting |
| 5 cm | Kiesbett / Gravel bed |
| 3 cm | Schlammziegel / Mud bricks |

Fig.32 Comparació de l'energia incorporada d'un edifici convencional i la Casa Rauch.

Fig.33,34 Comparació de la secció constructiva d'un edifici convencional i la Casa Rauch.

_Sostenibilitat ecològica.

L'objectiu principal de la Casa Rauch no és la reducció de la demanda energètica, sinó l'ús de materials ecològics. Una simulació de l'edifici duta a terme per la Universitat de Ciències Aplicades i Arts de Lucerna estima la demanda d'energia de calefacció en 72 kWh/m²a, superior als requeriments de ÖNORM H5055 que fixa la quantitat en 54 kWh/m²a.²⁶

Els materials s'obtenen principalment a la situació de l'edifici o al seu entorn pròxim. La terra emprada pertany a l'excavació de l'emplaçament i en funció de la seua granulometria s'utilitzen per a les voltes del soterrani, els sòls, els murs i el camí d'accés.

La fusta de les bigues és originària dels boscos immediats i el roure de les fusteries és del sud d'Alemanya. També s'utilitzen elements reciclats com és el cas de les canonades d'argila cuita, que foren trobades durant l'excavació i tenien més de 50 anys.

Per contra, el suro utilitzat als forjats prové de Sardenya. L'energia incorporada d'aquest material correspon al seu transport, ja que és el producte de rebuig de la producció de botelles

de suro i no necessita energia per a la seua transformació.

L'estimació d'energia incorporada de la Casa Rauch correspon a la producció i provisió de materials, juntament amb la consideració de les possibles substitucions i el futur enderrocament de l'edifici. Tanmateix, no es comptabilitza el consum d'energia durant l'ús i el manteniment de l'edifici.

S'estima que ha sigut necessari un 40% menys d'energia en comparació a l'ús de materials convencionals. Mentre que per a la Casa Rauch s'estimen 2300 MJ/m², que equival a 52 MJ/m²a; per a un edifici convencional de similars característiques serien necessaris 4400 MJ/m² o 91 MJ/m²a.

Convé remarcar la necessitat d'un major espessor dels murs de terra compactada en comparació als materials convencionals per aconseguir les mateixes propietats tèrmiques i estructurals. Però, malgrat necessitar una major quantitat de material, l'energia incorporada del conjunt continua sent menor.

²⁶ BOLTSHAUSER, R. et al. (2011). *The Rauch House: a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser.

Per altra banda, l'elecció de la terra com a material principal millora la qualitat de l'ambient interior. S'aconsegueixen temperatures situades majoritàriament a la zona de confort, així com una millora de la humitat de l'aire interior. Les propietats higroscòpiques de la terra proveïxen una humitat relativa significativament més constant a estiu i hivern. A estiu la humitat relativa es situa sempre dins de la zona de confort, considerada entre el 30 i el 60%.

Finalment, l'elecció d'un material sense additius preveu un enderrocament de l'edifici que no perjudique l'entorn. La terra es podria quedar al lloc o tornar a ser utilitzada sense vore reduïdes les seues propietats. No obstant, sí que caldria preveure la reciclabilitat o eliminació de la resta d'elements com les instal·lacions, fusteria... A més a més, els elements de fusta tenen acabat natural, amb oli o estan tractats amb imprimació de caseïna, de forma que podrien processar-se sense suposar contaminació ambiental.

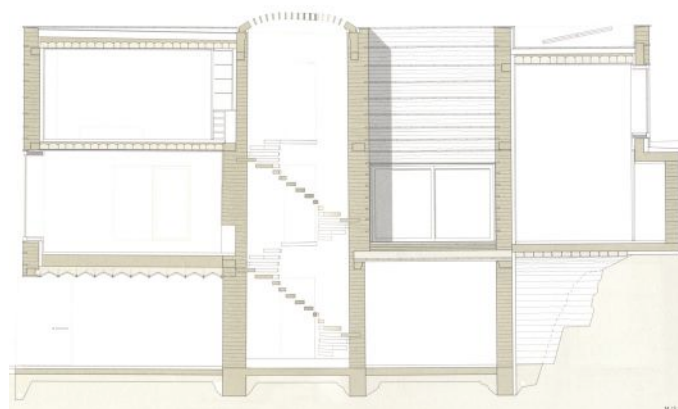


Fig.35 Secció longitudinal. S'observa l'ús de plafons solars a la coberta. El 100% de l'energia necessària per a calefacció i aigua calenta s'obté d'energies renovables.
Fig.36,37 Relació amb l'entorn. Vistes des de la planta baixa i la terrassa.



Fig.38,39,40 El sistema de ventilació permet una entrada d'aire sense destorbar l'usuari. Els diversos espais ofereixen abundant il·luminació amb vistes privilegiades.

Sostenibilitat econòmica.

L'elecció de materials i el treball col·laboratiu amb gent de la zona fomenta el desenvolupament d'aquesta. És un incentiu per a la creació de llocs de treball, així com per combatre l'èxode de les zones rurals.

L'ús de materials tradicionals suposa una major inversió en treball manual, per tant, millora les condicions dels treballadors pròxims. Es paga el treball de la persona i no el producte, aleshores és el treballador qui percep un augment dels ingressos. Cal remarcar que es calcula que al voltant del 55% dels costos de la Casa Rauch són deguts al treball manual a l'emplaçament per construir l'estructura i el material mateix, juntament al salari dels artesans locals. D'aquest 55%, fins al 35% són costos de la construcció de l'encofrat i de la compactació de la terra.

Sostenibilitat social.

La contractació d'assessors tècnics de la regió i d'artesans locals o de les localitats pròximes són un clar indicador de la sostenibilitat social. Com també es va explicar a l'apartat de sostenibilitat social, el fet de

treballar amb materials i gent de la zona augmenta el valor sociocultural de l'obra ja que l'arquitectura respon a les característiques del seu entorn i es crea un vincle entre allò construït i les persones que han participat en la seua construcció.

A més a més, l'obra té en compte les necessitats de l'usuari i prioritza la qualitat de l'espai exterior i interior. Les estances es situen en funció de la millor orientació per a l'ús determinat i s'aconsegueix una qualitat de l'aire interior agradable gràcies a les capacitats higroscòpiques de la terra i la manca d'additius químics.

Construcció amb terra.

L'estructura del projecte està formada per un sistema murari constituït per murs de terra compactada d'un espessor de 45 cm i forjats basats en el sistema *Doppelbaumdecke*²⁷. Es tracta d'un sistema tradicional de bigues de fusta obtingudes a partir del tall de tres dels costats d'un tronc massís. En aquest cas, els troncs són originaris dels boscos de la proximitat. Les bigues

²⁷ BOLTSHAUSER, R. et al. (2011). *The Rauch House: a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser.

disposades paral·lelament es recolzen sobre les bigues d'encercolat amb una capa de morter de terra ric en argila. Aquestes bigues d'encercolat estan fetes de *trass lime*²⁸ i estan reforçades amb acer.

Els forjats queden falcats als murs un espessor equivalent a 2/3 d'aquests. Esta estructura queda oculta inferiorment per plafons d'argila acabats amb enlluït de terra. L'acabat superior és de terra compactada al conjunt de l'edifici excepte a les zones humides i a la zona d'entrada. A aquestes zones s'utilitzen taulells ceràmics fets a mà disposats sobre morter de terra.

Finalment, destaca el forjat de la planta baixa, el qual es caracteritza pel seu recobriment de rajola. Aquests plafons de rajola es disposen sobre perfils en forma de T a l'inrevés i a la seua volta servixen com a encofrat perdut del morter de *trass lime*.

²⁸ *Trass* és un material format de putzolana natural que es troba a la regió renana, a Alemanya. Combinat amb la calç (*trass lime*) forma un producte pràcticament no soluble en aigua substituït de morter o ciment.

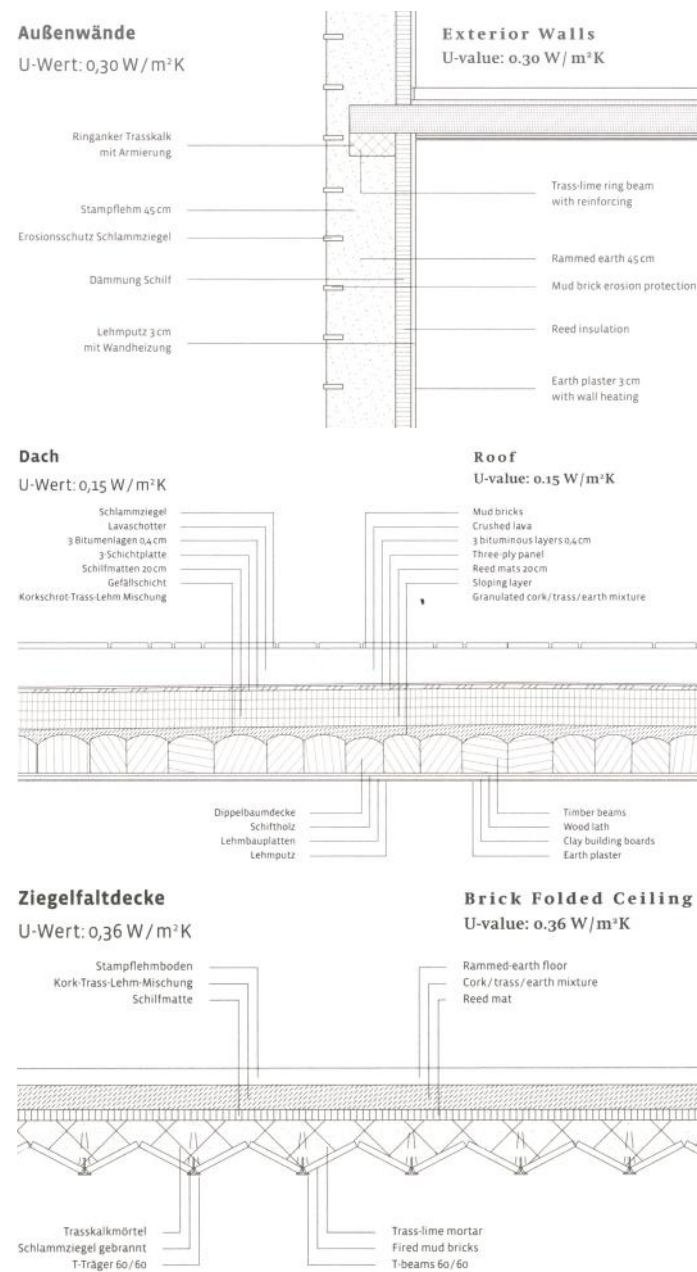


Fig.41 Detall del mur.
 Fig.42 Detall de la coberta.
 Fig.43 Detall del forjat superior de planta baixa.

5. AL BORDE I LA CASA ENTRE MUROS

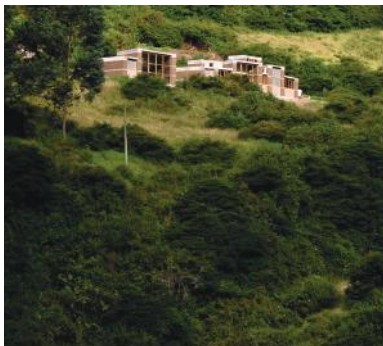


Fig.44 Equip Al Borde.

Fig.45 Vista exterior, relació amb l'entorn.

L'estudi *Al Borde* està encapçalat per quatre arquitectes que tenen la seua base a Quito, Equador. Els seus projectes partixen dels principis de recursos mínims i de col·lectivitat, com a ferramentes de responsabilitat social i desenvolupament creatiu.

Aquest equip, que va començar en 2007, ha sigut guardonat amb el *Premi d'Arquitectura Schelling* a Alemanya (2012), la *Medalla al Reconeixement Cultural d'Equador* (2012) i el *Premi Mundial d'Arquitectura Sustentable* en 2013 a París.²⁹

El cas d'estudi seleccionat és la *Casa Entre Muros*, construïda entre 2007 i 2008 a Tumbaco, Quito (Equador); projectada per David Barragán i Pascual Gangotena. Aquesta vivenda va ser nominada en 2014 al *Premi de les Amèriques Mies Crown Hall* i va rebre en 2009 el *20+10+X Premi d'Arquitectura, Tercer Cicle*.³⁰ La raó de l'elecció és pel seu ús magistral de la terra compactada a una zona sísmica com és Equador i per la sensibilitat i riquesa a la materialitat de l'obra.

29 AL BORDE <http://www.albordearg.com/nosotros_us/#/quienes-somos_who-we-are> [Consulta: 9 de juny de 2016]

30 Ibid.

La bellesa de la *Casa Entre Muros* rau en el diàleg que manté amb el seu entorn. Situada a les falces del volcà Ilaló, gaudeix d'un entorn idíl·lic. Es realitza un tall al terreny per crear la plataforma sobre la que s'assenta el conjunt, que servix a la vegada per abastir-se de matèria primera per a la construcció.

El motor del projecte és la successió de refugis per garantir l'autonomia dels tres membres de la família. Aquesta sèrie d'espais queda unificada pel corredor situat al nord-est, pensat per augmentar la privacitat respecte dels veïns. Per tant, totes les estances projecten les vistes cap a la vall.

Sostenibilitat ecològica.

L'elecció de materials prioritza aquells que siguen tradicionals, de baix impacte ambiental i que es troben en harmonia amb l'emplaçament. Tal com passa a la Casa Rauch, la *Casa Entre Muros* aprofita el material de l'excavació per realitzar els murs de terra compactada. S'evita l'ús de productes químics per al tractament dels materials naturals, de fet, la fusta i la canya es tallen en bona lluna per evitar aquesta mena d'additius.

La materialitat mostra un joc entre fusta, canya, pedra, terra i formigó, que potencia les seues qualitats estètiques i funcionals.

Altres paràmetres ecològics són la recol·lecció d'aigües grises les quals, després de passar per piscines de tractament, són aprofitades per al reg dels terrenys cultivables. A més a més, es dissenya un bany sec i un sistema d'escalfament d'aigua solar.

Sostenibilitat econòmica.

De nou, es tracta d'una construcció labor intensiva que millora les condicions dels treballadors locals. Representa un incentiu per a l'economia de la zona.

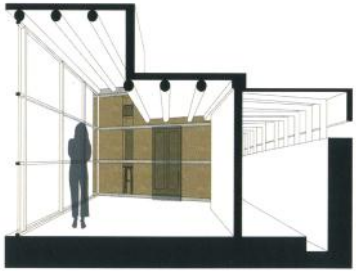
El pressupost reduït es pren com un al·licient per optimitzar els recursos materials i econòmics. Fins i tot, la potència dels murs es veu aprofitada amb l'excavació puntual per poder disposar el mobiliari.



Fig.46,47 L'exterior reflectix l'entorn mateix i l'interior els materials de construcció: pedra, terra, fusta i canya. El reforç estructural horitzontal de formigó també queda vist.

Fig.48 Vista pròxima a l'accés. El projecte respon a la materialitat de l'entorn.

Fig.49 Economia de l'espai i dels recursos.



Sostenibilitat social.

A la *Casa Entre Muros* s'estableix un vincle entre allò construït i l'entorn, de vital importància per a la propietària. Fins i tot es duu a terme una cerimònia ancestral que consisteix a demanar permís al volcà per tal de construir en ell. Es soterrren unes ofrenes per generar un centre energètic a l'espai que divideix allò social d'allò privat, que es converteix en el punt de contacte entre els usuaris i el volcà.³¹

També destaca la qualitat de l'espai interior. La gradació d'altures queda ajustada a les necessitats de l'espai, disposant menor volum per al corredor i oferint espais que creixen amb el caràcter públic i decreixen amb la privacitat. Així, l'altura augmenta cap a les vistes per tal de potenciar-les.

Les estances reben llum directa amb orientació sud-oest, i llum indirecta que prové del nord-est. La qualitat de l'ambient interior es veu afavorida per les propietats tèrmiques i higroscòpiques de la terra, així com per l'absència de productes químics.

Construcció amb terra.

El risc de sisme d'Equador afegix dificultats als requeriments estructurals. El sistema estructural es basa en murs de terra disposats obliquament, per tal d'evitar l'efecte dominó. A més a més, aquestos murs estan reforçats per cèrcols de formigó horitzontals disposats cada metre. També s'observen uns reforços verticals de formigó del mateix espessor, situats cada 2 metres aproximadament.

En l'altre sentit es situen unes parets diagonalitzades de *bareque* que queden connectades als murs de tàpia, com es pot veure a les següents fotografies.

Fig.50,51 Seccions transversals. Gradació d'altures i obertura cap a la vall.

Fig.52 Detall mur *bareque*.

31 PLATAFORMA ARQUITECTURA <<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-25319/casa-entre-muros-al-borde>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

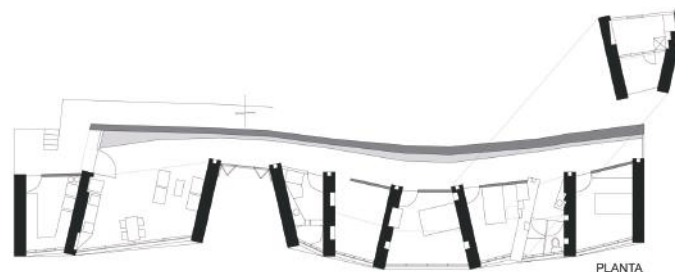
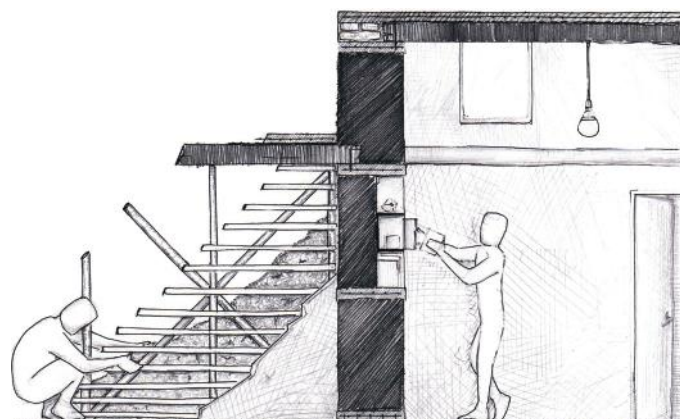


Fig.53 Detall constructiu. S'observa la connexió entre la tàpia i els murs de bareque, disposats perpendicularment.

Fig.54 A la planta s'observa el sistema murari no paral·lel.

Fig.55 Procés constructiu de la Casa Entre Muros.

6. INVESTIGACIONS

Malgrat els nombrosos avantatges de la terra com a material de construcció, és necessari avançar en la millora de les seues debilitats, les quals estan relacionades amb la resistència mecànica i el comportament a l'aigua. Tradicionalment, la resistència dels murs de terra compactada no estabilitzada, estimada entre 1 i 3 MPa³², no els ha fet adients per a estructures excessivament altes, però sí que han sigut utilitzats amb freqüència per a 2 o 3 altures³³.

L'objectiu d'estabilitzar un sòl és millorar la seua capacitat portant i la seua resistència a la intempèrie, i açò es pot aconseguir mecànicament, físicament o químicament.³⁴

_estabilització mecànica. Tracta l'estructura del sòl. Per exemple, la compactació augmenta la densitat

32 BUI, T.T. et al. (2014). "Failure of rammed earth walls: from observations to quantifications" a *Construction and Building Materials*, pp.295-302. <hal-00918221>

33 BUI, Q.B. et al. (2009). "Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering" a *Building and Environment*, vol. 44, 912-919

34 RIGASSI, V. i CRATERRE-EAG (1985). *Compressed earth blocks: manual of production*. Alemanya: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE. <<http://www.ecohabitar.org/wp-content/uploads/2012/01/04-57921.pdf>> [Consulta: 15 de juny de 2016]

del sòl i, per tant, incrementa la seua resistència i disminueix la seua permeabilitat.

_estabilització física. Reforça el sòl per mitjà de fibres d'origen orgànic (palla, bambú), animal (pèl, llana), mineral o sintètic (fibres sintètiques). Suposa l'augment de la resistència a tracció i cisallament.

_estabilització química. Reaccions com la cimentació i l'adhesió modifiquen les propietats del sòl.

_cimentació: el ciment, normalment Portland, reacciona principalment amb la part arenosa del sòl i es genera una matriu tridimensional. L'esquelet recobreix les partícules i resisteix el moviment juntament amb el material.

_adhesió: la matriu inert es basa en la reacció de l'argila. La matriu es pot formar per les pròpies argiles o amb les argiles, en ambdós casos es redueixen els efectes de contracció i dilatació. En el primer cas l'estabilitzador actua com intermediari per incentivar la unió entre partícules d'argila. En el segon, l'estabilitzador reacciona amb l'argila per crear un nou material inert i insoluble, semblant a un tipus de ciment. Es tracta d'una reacció putzolànica, s'obté principalment amb calç.

L'estabilització química es pot realitzar amb calç o ciment, sent aquest últim àmpliament utilitzat als blocs de terra compactada. La cerca d'alternatives al ciment com a estabilitzador és conseqüència dels seus elevats costos econòmics i ecològics. Per una banda, el cost del ciment pot representar fins al 50%, normalment entre el 20 i el 40%, dels costos totals de producció.³⁵ A més a més, per cada tona de ciment es produeix una tona de CO₂.³⁶

Les següents investigacions se centren en la substitució del ciment Portland mitjançant ciments activats alcalinament (CAA) o geopolímers, i en l'aplicació d'aquests a mostres de terra i blocs de terra compactada.



| MEANS | PRINCIPLE | SYMBOL |
|--------------------|--|--------|
| INCREASING DENSITY | CREATING A DENSE ENVIRONMENT WHICH BLOCKS PORES AND CAPILLARY CHANNELS | |
| REINFORCING | CREATING AN OMNI-DIRECTIONAL REINFORCEMENT WHICH REDUCES MOVEMENT | |
| CEMENTATION | CREATING AN INERT MATRIX WHICH RESISTS ALL MOVEMENT | |
| BONDING | FORMING STABLE CHEMICAL LINKS BETWEEN THE CLAY CRYSTALS | |
| WATER-PROOFING | COATING THE SOIL PARTICLES IN AN IMPERMEABLE LAYER AND BLOCKING PORES AND CHANNELS | |
| WATER-DISPERSAL | MAXIMUM ELIMINATION OF WATER ABSORPTION AND ADSORPTION | |

Fig.56 Estudi de durabilitat de murs de terra compactada exposats a la intempèrie durant 20 anys. Per a murs no estabilitzats s'observa una erosió de 6.4 mm (1.6% l'espessor del mur); per a murs estabilitzats amb un 5% de calç hidràulica l'erosió és de 2 mm (0.5% l'espessor del mur). Considerant una erosió del 5% de l'espessor per motius de servici, l'esperança de vida d'un mur no estabilitzat és de més de 60 anys.

Fig.57 Mur de terra compactada de 150 anys a una casa al Sud-Est de França.
Fig.58 Diferents formes d'estabilitzar el sòl.

35 RIGASSI, V. i CRATERre-EAG (1985). Compressed earth blocks: manual of production. Alemanya: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE. <<http://www.ecohabitar.org/wp-content/uploads/2012/01/04-57921.pdf>> [Consulta: 15 de juny de 2016]

36 ZHANG, M. et al. (2013). "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer" a *Construction and Building Materials*, vol. 47, 1468-1478.

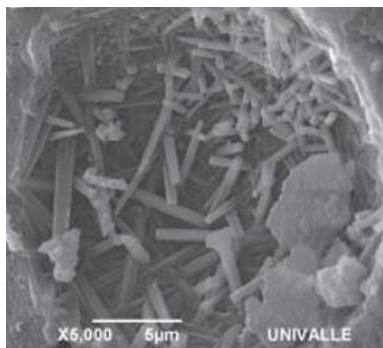
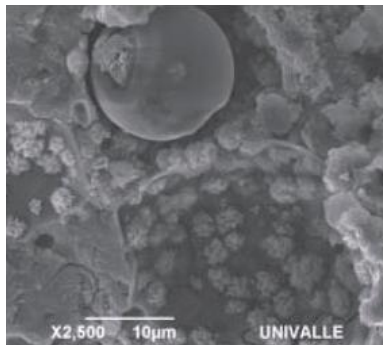
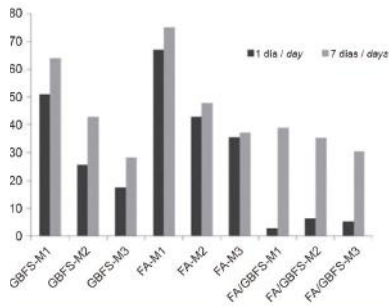


Fig.59 Resistència a compressió dels sistemes geopolimèrics.
Fig.60,61 Microestructura del sistema activat alcalinament FA-M3.

La primera investigació exposada es basa en l'estabilització de polímers a partir d'una activació alcalina.³⁷ Primerament, cal introduir el concepte d'activació alcalina. Es requereixen dos components, una matèria prima de tipus aluminosilicat (precursor) i una dissolució alcalina (activador). El precursor es pot obtenir d'origen natural (metacaolí) o de subproductes industrials, mentre que l'activador més normalitzat és el silicat sòdic. Aquest és de tipus industrial i demanda un elevat consum energètic i de recursos naturals. Per tant, l'estudi proposa la cendra de corfa d'arròs (RHA) com a font de sílice que substituïska totalment el silicat de sodi en sistemes activats alcalinament.

El mecanisme per a l'adormiment i posterior enduriment del geopolímer s'inicia amb la dissolució de l'aluminosilicat en medi alcalí. Li segueix el transport o orientació dels ions de sílice i alumini, i finalitza amb la policondensació o polimerització que dóna origen a noves estructures de major rigidesa.

37 MEJÍA, J.M., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. i PUERTAS, F. (2013). "Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente" a *Materiales de Construcción*, vol. 63, 311, 361-375.

Els productes obtinguts en l'activació alcalina són materials inorgànics no combustibles, formats a baixes temperatures. Són resistents al foc i als atacs àcids. Presenten un comportament hidràulic similar a una pasta produïda amb ciment Portland i aconsegueixen resistències mecàniques a curt termini, que augmenten amb el temps.

L'estudi de Mejía et al. analitza tres precursors: cendra volant (FA), escòria siderúrgica d'alt forn (GBFS) i un sistema híbrid dels dos anteriors (FA/GBFS). Aquests precursors són activats per mescles d'hidròxid de sodi amb silicat de sodi comercial (M1), cendra de corfa d'arròs obtinguda a laboratori (M2) i cendra de corfa d'arròs obtinguda com a subproducte d'una Arrossera a Colòmbia (M3). La cendra de corfa d'arròs obtinguda a laboratori té una naturalesa més amorfa, mentre que la de l'arrossera té una naturalesa més cristal·lina i necessita majors temperatures o majors temps de reacció; no obstant suposa una major sostenibilitat per l'aprofitament d'un material de residu.

El resultat són morters amb resistències a compressió als 7 dies de curat, de valors superiors als corresponents de materials produïts amb base exclusivament de ciment Portland. Amb aquesta

investigació es prova la possibilitat d'obtenir precursors i activadors a partir de residus o subproductes, sent la cendra volant el precursor que majors resistències a compressió ofereix. Encara que el silicat comercial (M1) té majors prestacions, els activadors a partir de cendra de corfa d'arròs gaudixen de resistències a compressió de fins a 42 MPa als 7 dies de curat amb un cost econòmic i ecològic pràcticament nul.

El segon estudi és l'elaborat per M.Zhang i col.laboradors.³⁸ S'analitzen les propietats de diversos productes elaborats a partir d'una mateixa matèria prima: una terra argilosa. Es comparen les característiques d'una mostra de terra no estabilitzada, una mostra estabilitzada amb un 5% de ciment Portland i diverses mostres resultat de diferents concentracions de geopolímer. En aquest cas, l'aluminosilicat és d'origen natural, el metacaolí (MK), el qual prové d'un tractament tèrmic d'argila caolinítica.

Els resultats indiquen que la resistència a compressió augmenta amb el

percentatge de geopolímer, i que per a concentracions de geopolímer superiors a l'11% s'obtenen resistències a compressió superiors a la mostra amb un 5% de ciment Portland (PC5). S'observa que no hi ha gran diferència en la resistència obtinguda als 7 i als 28 dies de curat. Açò és degut a la rapidesa de les reaccions del precursor basat en el geopolímer de MK, de forma que s'obtenen grans resistències ràpidament i després s'estabilitza l'augment.

A més a més, amb la concentració MKG augmenta la ductilitat i disminueixen les retraccions. Com a conseqüència, es reduïx el clavillament durant la construcció, el curat i l'operació del producte aplicat a la construcció. Els investigadors conclouen que el producte d'una estabilització amb elevades concentracions de geopolímer són microestructures més compactes, amb porus més menuts i més distribuïts. De forma que es milloren les propietats mecàniques i l'estabilitat volumètrica. Encara que és necessari un major percentatge de geopolímer (10-15%) en comparació al percentatge de ciment (5%), cal recordar que, com demostra el primer estudi, el geopolímer es pot obtenir a partir de residus agroindustrials. Així, s'emfatitza la sostenibilitat ecològica i econòmica de la solució.

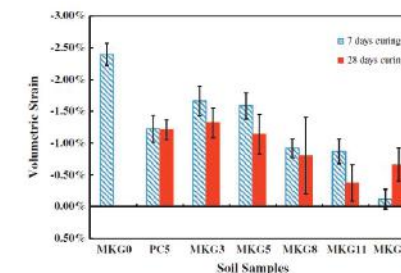
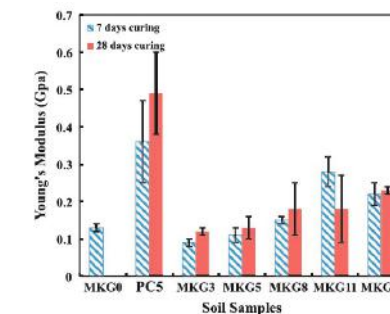
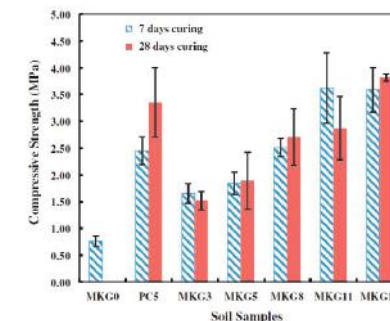


Fig.62 Resistència a compressió.

Fig.63 Mòdul de Young.

Fig.64 Deformació volumètrica.

³⁸ ZHANG, M. et al. (2013). "Experimental feasibility study of geopolimer as the next-generation soil stabilizer" a *Construction and Building Materials*, vol. 47, 1468-1478.



Fig.65,66 Maquinària per elaborar blocs de terra compactada (BTC).

Fig.67 BTC no estabilitzat.

Fig.68 BTC estabilitzat, ús de cendra de corfa d'arròs.

Finalment, l'estudi de l'equip del *Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Universitat Politècnica de València (ICITECH-UPV)* consolida l'estabilització de sòls amb ciments activats alcalinament.³⁹ En aquest cas el precursor s'obté de residu de catalitzador del craqueig del petroli (FCC) i l'activador, com al cas anterior, de la corfa de cendra de arròs (CCA) mesclat amb NaOH. Aquest equip justifica l'ús d'aquests dos residus per les grans quantitats generades anualment. Afirmen que sols l'empresa Ecopetrol, que abarca el 35% de la producció Colombiana de petroli, va produir en 2012 al voltant de 2000 tones de residu de FCC. Respecte a la producció anual mundial de CCA, l'estimen pròxima als 100 milions de tones.

La investigació compara blocs de terra comprimits estabilitzats amb ciment Portland tipus CEM I 52,5R; blocs estabilitzats amb geopolímer i blocs sense estabilitzar.

S'observen resistències molt superiors als blocs de terra estabilitzats amb geopolímer respecte als que fan ús del

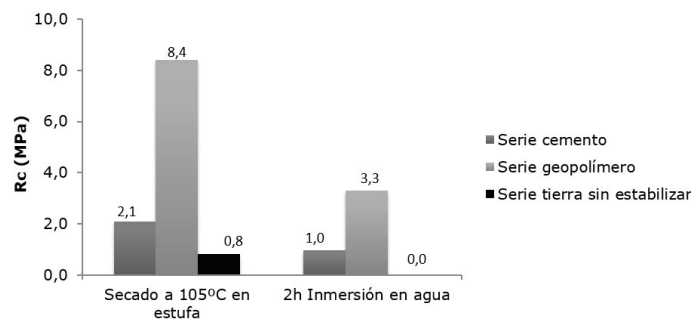
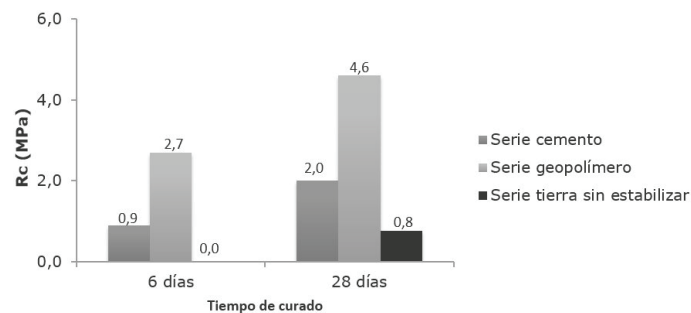
ciment Portland. Aquests resultats són evidents als diferents temps de curat. L'estabilització mitjançant geopolímer obté resistències entre 3 i 2,3 voltes majors que les obtingudes a partir de ciment Portland. A més a més, als 28 dies de curat l'estabilització de geopolímers mostra resistències a compressió 5,75 voltes superiors a la dels blocs sense estabilitzar. Encara més, els assaigs d'assecat a 105° a estufa i de 2 hores d'immersió en aigua constaten la major resistència dels blocs de terra estabilitzats amb geopolímer respecte a l'estabilització Portland.

Així mateix, realitzen l'estimació dels costos dels materials necessaris per a elaborar 1 m³ de sòl estabilitzat, a partir de productes Colombians. D'aquesta forma es mostra un preu significativament major per a elaborar 1 m³ de sòl estabilitzat amb ciment Portland respecte a l'estabilització mitjançant els geopolímers esmentats.

³⁹ COSA, J. et al. (2016) "Estabilización de suelos con cementos activados alcalinamente: Una solución más sostenible para la construcción de viviendas en países en desarrollo" a *III Congreso de Estudios de Desarrollo*, Saragossa. 29 de juny a l'1 de juliol de 2016

L'anàlisi d'aquests tres estudis assenyala que l'ús de geopolímers permet obtenir morters sostenibles amb resistències de l'ordre de 40 MPa, que una volta aplicats juntament amb la terra, augmenten la resistència d'aquesta fins a valors de l'ordre de 4 MPa. És a dir, l'estabilització ofereix una millora de la resistència mecànica del sòl, de la seua ductilitat i reduïx el risc de fissures degudes al canvi de volum del material. Aquestes propietats, generalment, augmenten amb l'increment de percentatge de geopolímer. Per últim, cal destacar que encara que l'estabilització amb geopolímers requereix major quantitat de producte en comparació a l'estabilització Portland, es pot obtenir a partir de deixalles industrials. Així, s'abarateix el procés i es contribueix a la reducció de gasos contaminants.

Aquesta mena d'estudis promou la importància de continuar avançant en la investigació dels materials de construcció més respectuosos amb el nostre entorn, en particular, en el cas de la terra com a material arquitectònic. Els avanços en la sostenibilitat material són clars indicadors del progrés de la sostenibilitat de l'arquitectura.



| Material | Cantidad | Coste unitario | Costes Parciales |
|------------------|---------------------|-----------------------|------------------|
| Tierra | 1587,30 kg | 0,00 €/kg | - € |
| FCC | 158,70 kg | 0,00 €/kg | - € |
| H ₂ O | 0,23 m ³ | 0,80 €/m ³ | 0,18 € |
| CCA | 66,70 kg | 0,00 €/kg | - € |
| NaOH | 68,60 kg | 0,31 €/kg | 21,30 € |
| Total | | | 21,48 € |

| Material | Cantidad | Coste unitario | Coste Parciales |
|------------------|---------------------|-----------------------|-----------------|
| Tierra | 1587,30 kg | 0,00 €/kg | - € |
| CP | 158,70 kg | 0,39 €/kg | 61,89 € |
| H ₂ O | 0,17 m ³ | 0,80 €/m ³ | 0,14 € |
| Total | | | 62,03 € |

Fig.69 Variació de la resistència a compressió amb el tipus d'estabilitzador i el temps de curat.

Fig.70 Variació de la resistència a compressió amb la immersió en aigua durant 2h.

Fig.71 Cost de producció d'1 m3 de sòl estabilitzat amb geopolímer.

Fig.72 Cost de producció d'1 m3 de sòl estabilitzat amb ciment Portland.

7. CONCLUSIONS...

"L'originalitat consisteix en el retorn a l'origen; així doncs, original és allò que torna a la simplicitat de les primeres solucions."
Antoni Gaudí.

_de l'elecció de materials.

Fomentar l'ús de materials tradicionals no deu considerar-se com un retrocés, sinó com una mirada que valora els recursos tradicionals per avançar cap a una arquitectura més sostenible a nivell global.

Els materials low-tech proven la validesa de les seues qualitats estètiques, tècniques i sostenibles. Per mitjà d'ells, es pot oferir una arquitectura més natural i artesanal.

Si bé és cert que l'ús de materials tradicionals sols redueix un 20% de les emissions d'efecte hivernacle, davant del 80% que suposa l'ús del propi edifici; considere que és el primer pas a tindre en compte per tal de reduir l'impacte ambiental i social. L'elecció de materials és una de les primeres qüestions que apareixen a qualsevol projecte, responent a l'entorn i al programa. Es tracta d'una decisió que, encara que a nivell individual pot semblar irrellevant, a nivell global, edifici a edifici, fa possible construir una arquitectura més sostenible.

Finalment, cal dir que la materialitat es una decisió per la qual som qüestionats a cada projecte al llarg de la carrera.

Els aspectes formals, els funcionals, la idea que mou el projecte. No obstant, les decisions sobre els materials o fins i tot sobre el funcionament del propi edifici a nivell mediambiental passen inadvertides. No són qüestionades. No ens demanen reflexió. Considere que la sostenibilitat és encara una assignatura pendent a moltes universitats.

_de la sostenibilitat mediambiental.

L'ús de materials low-tech, i en particular l'ús de la terra compactada, implica un grau elevat de sostenibilitat mediambiental. Representen els valors més reduïts d'energia incorporada, la qual cosa té com a resultat una menor energia necessària per a l'obtenció del producte i, per tant, una menor contaminació.

La terra compactada necessita sols 158 MJ per obtindre un m³ del material, el valor més baix dins dels materials de construcció. Açò és conseqüència de l'extracció del material del propi emplaçament de l'edifici, sempre que les característiques del sòl ho permeten, i de la reduïda energia no renovable necessària per a construir amb ella. La manufactura s'obté principalment gràcies

a l'energia humana i els transports requerits són limitats.

A més a més, la naturalitat dels materials low-tech implica un reciclatge respectuós. La terra no estabilitzada es pot tornar al lloc d'origen o ser utilitzada novament a una altra construcció, els elements de fusta poden ser reutilitzats o reciclats com a combustible, el cartró es pot reciclar per a produir nous productes... En definitiva, els materials low-tech són materials naturals, orgànics, que no suposen un perill a l'hora de ser reciclats i que finalitzen el cicle de vida tornant a formar part del planeta mateix.

Els materials low-tech es basen en la proximitat de les matèries, dels treballadors i el treball. Procura abastir-se d'un entorn pròxim fent un ús raonable dels recursos.

de la sostenibilitat econòmica.

La proximitat dels recursos és, com ja s'ha exposat prèviament, un incentiu per a l'economia de la zona. L'objectiu de recórrer a materials i treballadors pròxims és establir una estructura econòmica durable. En altres paraules,

crear xarxes laborals entre els treballadors i les empreses de la zona per promoure el desenvolupament local. Com a conseqüència, augmenta la confiança en els recursos propis i disminueix la dependència de les forces estrangeres i dels mercats globals.

Per altra banda, parlar de materials low-tech vol dir parlar d'accessibilitat econòmica als propis materials. El cas de la terra compactada és el cas més evident, on la matèria primera és gratuïta. Les úniques despeses són aquelles relacionades amb el lloguer o la compra de l'equip necessari per a l'extracció.

Finalment, cal remarcar el concepte de preu real que s'ha explicat al principi del TFG. El preu final d'un producte amb materials tradicionals és més car que el d'aquells productes industrialitzats pel simple fet que no s'internalitzen les externalitats negatives derivades de la producció d'aquests últims. Si es vol avançar cap a un foment de l'economia nacional cal centrar-se en els productes produïts a les proximitats que donen treball a la gent pròxima. Açò exigix una major implicació política per tal d'aplicar impostos que descoratgen els productes contaminants o apostar per un foment de les forces autòctones.

de la sostenibilitat social.

Els principis d'accessibilitat, escala local i treball artesanal, enunciats per Schumacher, són clars indicadors de la sostenibilitat social oferida pels materials low-tech.

Diversos projectes elaborats amb terra compactada, principalment a països africans, cerquen la plena sostenibilitat social. Es pretén millorar la qualitat de vida dels habitants amb projectes d'arquitectura creats per ells mateixos amb els recursos que tenen a l'abast. És així com pren sentit el concepte de *producció per les masses* que teoritzava Gandhi. Es tracta d'una producció que fa un aprofitament màxim dels recursos mínims. Demuestra que és possible construir amb mecanismes simples que evolucionen de la tecnologia primitiva gràcies als nous coneixements.

Aquests casos pràctics són perfectament aplicables als països europeus. Els materials low-tech a l'arquitectura contemporània són un motor per a generar ocupació de qualitat. Creen un vincle amb l'arquitectura vernacla, de forma que es creen espais urbans harmonitzats que reivindiquen el patrimoni arquitectònic.

Al cap i a la fi, es tracta de fer ús d'una arquitectura que procure llocs de treball, enlloc de destruir-ne com passa amb la mecanització. Una arquitectura al servei de la societat. Una arquitectura que millore les condicions de vida a partir de l'esforç propi.

dels casos d'estudi.

La Casa Rauch i la *Casa Entre Muros* mostren un domini magistral de la tècnica de la terra compactada combinada amb altres materials low-tech com són la fusta, la canya, la pedra...

Ambdós projectes tenen en comú la seua situació a un emplaçament privilegiat rodejat de natura. Açò pot dur a la reflexió sobre una major protecció dels recursos naturals, ja que una construcció descontrolada de residències unifamiliars té com a resultat la dispersió urbana, sobre la qual ja s'ha raonat amb anterioritat.

No obstant, cal puntualitzar que els dos projectes tracten de generar el mínim impacte possible al seu entorn.

Respecte a l'accessibilitat dels dos emplaçaments, la Casa Rauch disposa de transport públic pròxim, com l'autobús i el tren, situats a uns 25 minuts a

peu. A més a més, la casa es troba a 3 minuts caminant del lloc de treball del client. Per contra, la *Casa Entre Muros* està significativament allunyada del centre urbà. Aquesta situació repercutix en una major dependència del vehicle privat i un augment dels desplaçaments, contraris als principis de l'urbanisme sostenible.

Un altre aspecte que cal destacar és l'ús dels materials. Encara que les dos residències utilitzen majoritàriament materials de baix impacte ambiental, als dos casos trobem la presència del formigó. A la Casa Rauch apareix a la fonamentació únicament, i Rauch especifica que es tracta de formigó amb baix percentatge de ciment combinat amb *trass lime*, sense utilitzar intencionadament reforç d'acer. Contràriament, a la *Casa Entre Muros* forma part del conjunt estructural. Apareix als reforços horitzontals i verticals del projecte, aparentment justificats pel risc sísmic de Quito.

A més a més, convé remarcar el tractament dels materials. Martin Rauch es regix pel principi de la mínima alteració possible del material i per la sinceritat constructiva. Tots els seus materials queden exposats per mostrar la riquesa de la seua textura.

En el cas d'Al Borde, s'observa que la majoria dels materials queden sense recobriments. A excepció de la terra compactada i els murs de *bareque* que queden recoberts per un enlluït de color terrós. La lectura del sistema constructiu sí que diferencia la part de mur de terra compactada dels reforços horitzontals de formigó armat, en canvi, els reforços verticals queden ocults pel mateix recobriments.

En defensa d'ambdós casos d'estudi, crec que són dos clars exemples de la validesa dels materials tradicionals a l'arquitectura contemporània. Tots dos mostren l'exuberància dels recursos estètics que ofereixen els materials low-tech, la solidesa dels seus sistemes constructius i la repercussió pròspera a la societat de l'entorn.



dels avantatges i les dificultats de la terra compactada.

La terra compactada presenta abundants avantatges, que actualment passen inadvertits per la manca de confiança del públic no especialitzat.

En primer lloc cal emfatitzar les fortaleses d'aquest material. Es tracta d'un producte que s'obté a partir d'una dosificació determinada per les propietats de les matèries primeres i de les necessitats de l'edificació. Cada mur de terra compactada, per tant, és únic. Els matisos de la seua textura són variants al tacte i a la vista. Les irregularitats de la seua superfície són motiu de complexos jocs de llum i ombra.

Seguidament, les propietats tècniques del material compten amb una considerable resistència a compressió. No obstant, és cert que el comportament a esforços horitzontals i a l'aigua poden resultar limitats.

La composició natural del producte ofereix també espais que gaudixen d'una agradable qualitat de l'aire interior. Açò és conseqüència de les propietats higroscòpiques de la terra, és a dir,

la capacitat que tenen els materials d'absorbir la humitat atmosfèrica.

I, finalment, s'han comprovat els beneficis de sostenibilitat ecològica, econòmica i social que comporta l'ús d'aquest material. En resum, és una matèria fàcilment accessible d'abundants propietats que es pot obtenir a un cost pràcticament nul.

En segon lloc cal esmentar les debilitats del producte. La seua posada en obra està limitada per les condicions atmosfèriques, no es pot realitzar a baixes temperatures que suposen risc de gelada. A més a més, es tracta d'un procés lent i costós.

És evident la falta de confiança del producte i la necessitat d'una major normalització, sobretot als països europeus. També destaca l'absència de normativa al respecte que promoga el seu ús.

Per últim, cal fer menció de les oportunitats de la terra compactada. Els estudis encaminats a millorar les propietats de la construcció amb terra poden ser un clar incentiu per revitalitzar el seu ús. No obstant, cal tindre en compte quines són les

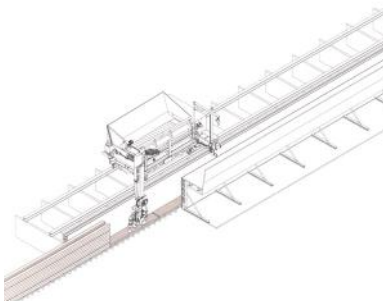


Fig.73 Ricola Herb Centre. Herzog & de Meuron i Lehm Ton Erde. Realitzada amb elements prefabricats.

Fig.74 Màquina desenvolupada per Lehm Ton Erde.

Fig.75 Magatzem amb elements prefabricats.

repercussions d'estabilitzar la terra. Alguns autors com Rauch i Otto Kapfinger afirmen que estabilitzar la terra amb ciment o additius químics basats en la silicona és un error ja que no són necessaris per a combatre les condicions climàtiques i, en canvi, suposa perdre moltes de les seues propietats naturals com és la capacitat d'absorbir la humitat.⁴⁰

Per altra banda, la falta de normativa comentada prèviament també pot ser una oportunitat per fomentar l'experimentació vinculada a la construcció amb terra.

A més a més, en els últims anys s'ha desenvolupat la possibilitat de la prefabricació de murs de terra compactada. L'estudi de Martin Rauch és un dels seus promotors. Aquest aspecte es pot veure com una oportunitat que permet reduir el temps de la posada en obra i els costos associats, així com la independència respecte a les condicions climàtiques. No obstant, cal ser cautelosos amb el risc que suposaria un excés relacionat amb la prefabricació.

I, per últim, considere que l'absència d'un monopoli associat a l'ús de terra

compactada és una oportunitat per desenvolupar la col·laboració entre diferents col·lectius d'experts: arquitectes, tècnics de la construcció amb terra i enginyers d'estructures.

de la construcció amb terra compactada.

A partir de l'estudi dels casos pràctics i d'altres exemples d'arquitectura amb terra compactada es pot concloure que aquesta treballa conjuntament amb altres materials low-tech i, fins i tot, pot ser reforçada per aquests.

Existeixen casos de terra compactada reforçada interiorment per canyes i fibres vegetals però, personalment, considere més interessant la possibilitat de desenvolupar la resposta col·lectiva de la terra i la fusta. Es tracta de dos materials d'elevades prestacions mecàniques i higroscòpiques. Com enuncia Martin Rauch, la terra disposa d'una humitat del 6 al 7% i la de la fusta, una volta estabilitzada, es situa al voltant del 9%. Per tant, la terra actua com a regulador de la humitat de la fusta.⁴¹

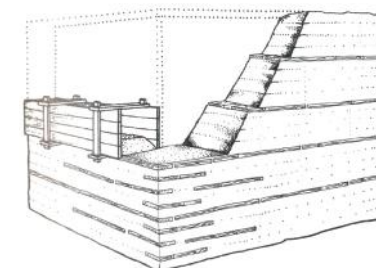
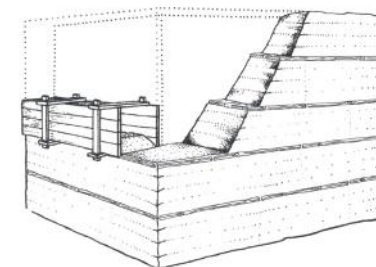
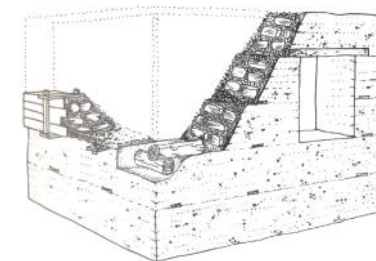


Fig.76,77,78 Diferents formes de reforç de tàpia amb fusta.

40 RAUCH, M., KAPFINGER, O. i SAUER, M. (2015). *Martin Rauch: refined earth construction and design with rammed earth*. Múnich: Detail.

41 RAUCH, M., KAPFINGER, O. i SAUER, M. (2015). *Martin Rauch: refined earth construction and design with rammed earth*. Múnich: Detail.



Fig.79 Mur de pallabarro a Verín, Galícia.

Fig.80 Exemple de colombage a Colmar, França.

Fig.81 Exemple de colombage a Estrasburg, França.

La fusta és un material que ha actuat tradicionalment com a reforç de la construcció amb terra. En forma de troncs o de taulers, s'utilitzava per reforçar els cantons de les construccions. També es podien emprar les taules de fusta com a filades del mur de tàpia.

Alguns exemples de construcció conjunta dels dos materials es poden trobar al nord de la península, a Galícia, mitjançant la construcció de *pallabarro*⁴². Es disposen travessers diagonals i verticals de fusta i la terra ocupa els buits deixats per la fusta. Aquesta tècnica se solia utilitzar a partir de la primera o la segona planta.

Més referents apareixen amb la tècnica del *colombage*⁴³, d'origen francès. Aquesta construcció associa una estructura de fusta que emmarca un conjunt de terra i palla. El disseny d'aquesta estructura vista de fusta pot arribar a ser molt elaborat.

42 MILETO, C., i VEGAS, F. (2014). *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. València: General de Ediciones de Arquitectura.

43 CRATerre-ENSAG et al. (2008). *Terra incognita: discovering european earthen architecture*. Portugal: Argumentum.

Per tant, a partir d'aquests referents i amb la certesa que ha sigut possible construir amb aquests materials edificis que arriben a les cinc altures, considere realment atractiva la possibilitat d'investigar sobre tècniques constructives contemporànies a partir d'aquestes dos matèries primeres. He elaborat diversos detalls a partir d'una estructura comú basada en els murs de terra compactada i forjats elaborats amb bigues de càrrega i bigues corona de fusta. Els tres detalls es diferencien en el tipus de reforç.

En el primer cas s'utilitzen taulers de fusta continus en la secció del mur que, a més a més, sobreixen uns 4 cm del plànol de façana per tal de protegir aquesta de la pluja. És un mecanisme inspirat en la solució de la Casa Rauch. El fet de tallar el recorregut de l'aigua, fa disminuir la seua velocitat i l'erosió que aquesta produïx sobre la terra. Per tal que la part del tauler que sobreix no transmeta un excés d'humitat a la terra caldria estudiar la necessitat d'impermeabilitzar la part exposada de fusta amb tractaments sostenibles.

Els reforços horitzontals, continus en la secció del mur, eviten dilatacions i contraccions diferencials i permeten una millor distribució de les càrregues.

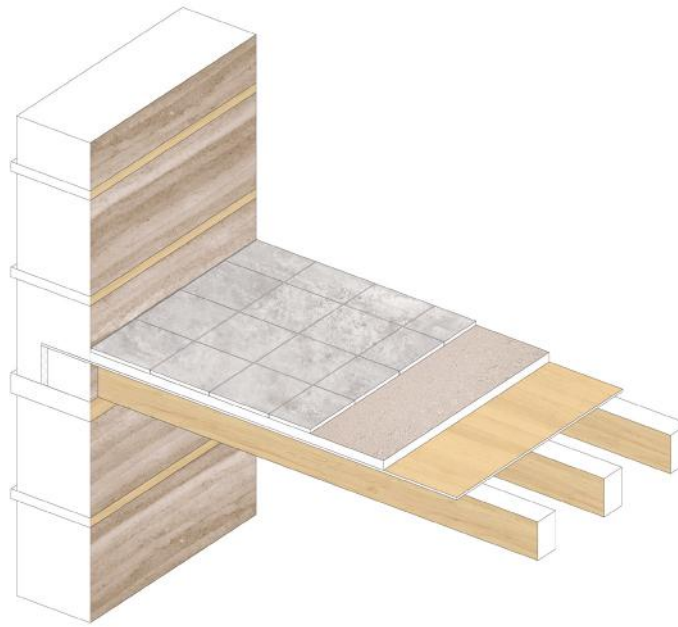
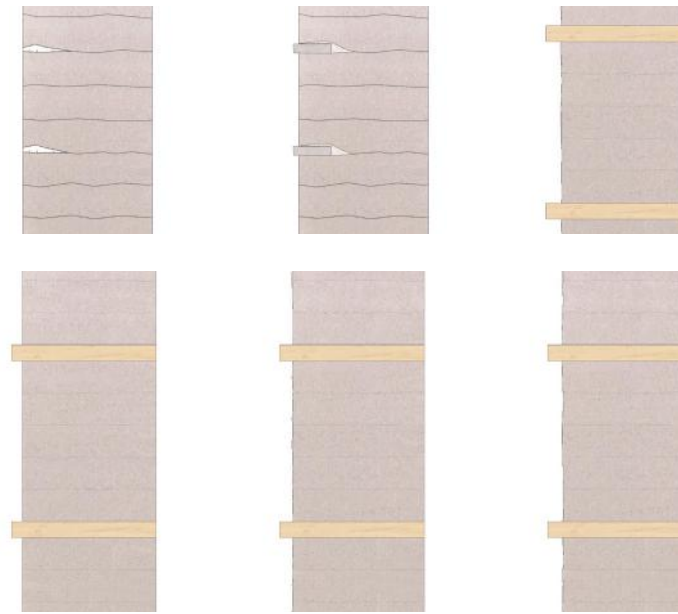


Fig.82 Diferents solucions constructives per reduir l'erosió provocada per la pluja. Les dos primeres són de M.Rauch, a partir de rajoles ceràmiques i de juntes d'erosió fetes amb morter *trass lime*. La tercera és la solució proposada amb taulers de fusta.

Fig.83 Evolució de l'erosió superficial amb el pas del temps.

Fig.84 Detall proposat 1.

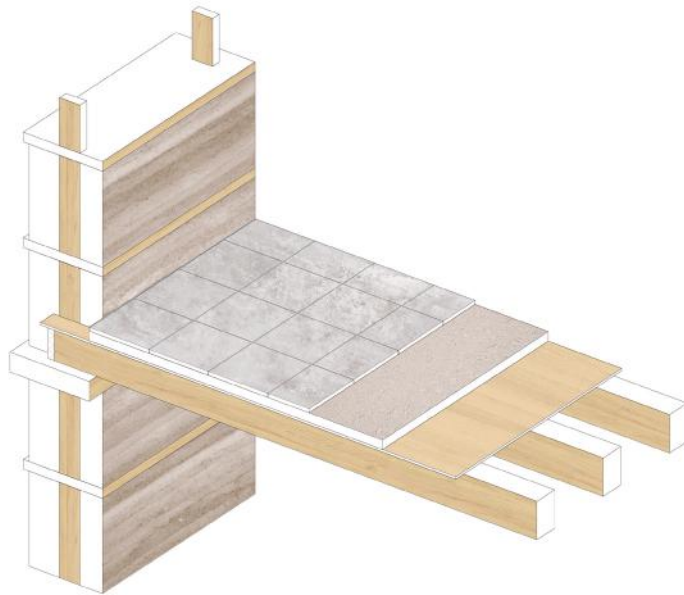
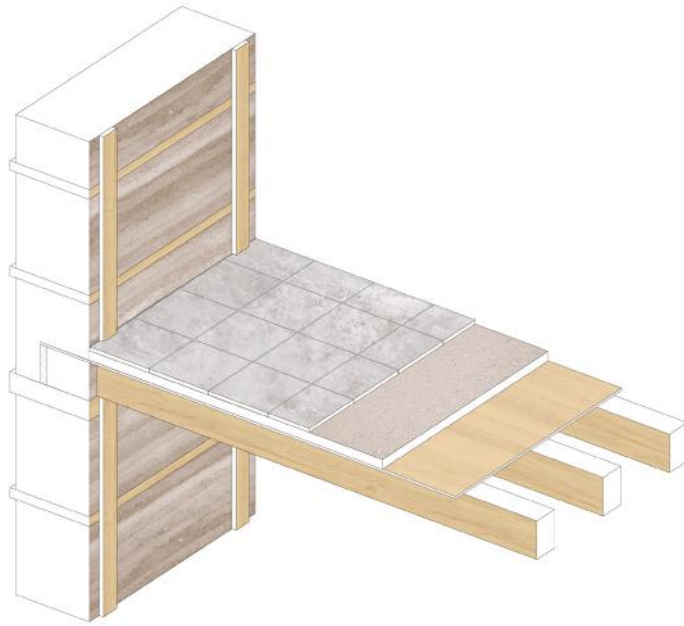


Fig.85 Detall proposat 2.
Fig.86 Detall proposat 3.

El segon detall parteix del primer, al qual se li afegixen uns reforços de fusta verticals a la cara interior de l'edifici, externs a la secció del mur. Aquests suports, amb una secció de 3 x 12 cm, estan disposats cada 1.2 m. Suposen la millora del primer sistema ja que també col·laboren amb el comportament de l'edifici a accions horitzontals. Els reforços es proposen vistos com a oportunitat estètica. El joc de la modulació pot oferir espais rics en materialitat i composició.

El tercer detall comparteix amb el primer i el segon, els taulers horitzontals disposats cada cinc capes de terra compactada. A més a més, situa reforços verticals de 14 x 6 cm de secció als espais entre els taulers horitzontals. Aquest detall també suposaria una col·laboració a l'acció horitzontal del vent o del sisme. No obstant, presenta diverses dificultats.

En primer lloc, la seua situació a l'interior del mur dificulta considerablement el procés de compactació de terra. A més a més, en cas que la transpiració del tancament no quede garantida, la fusta podria presentar problemes amb el temps i la seua

situació inaccessible impossibilitaria reparacions o substitucions senzilles.

Per últim, apareix la dificultat d'assegurar la col·laboració perfecta entre els dos materials.

Personalment, considere que els dos primers detalls (fig.84 i fig.85) oferixen solucions més netes i senzilles. No obstant, trobe que es tracta de solucions que s'haurien d'investigar amb més profunditat.

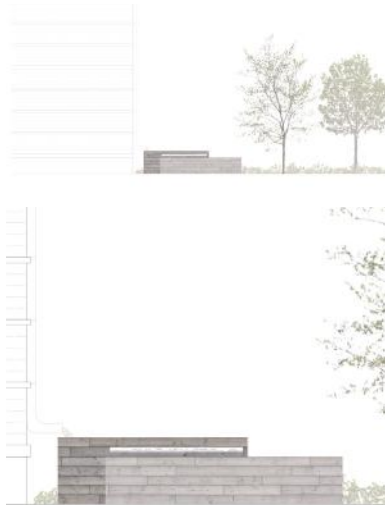
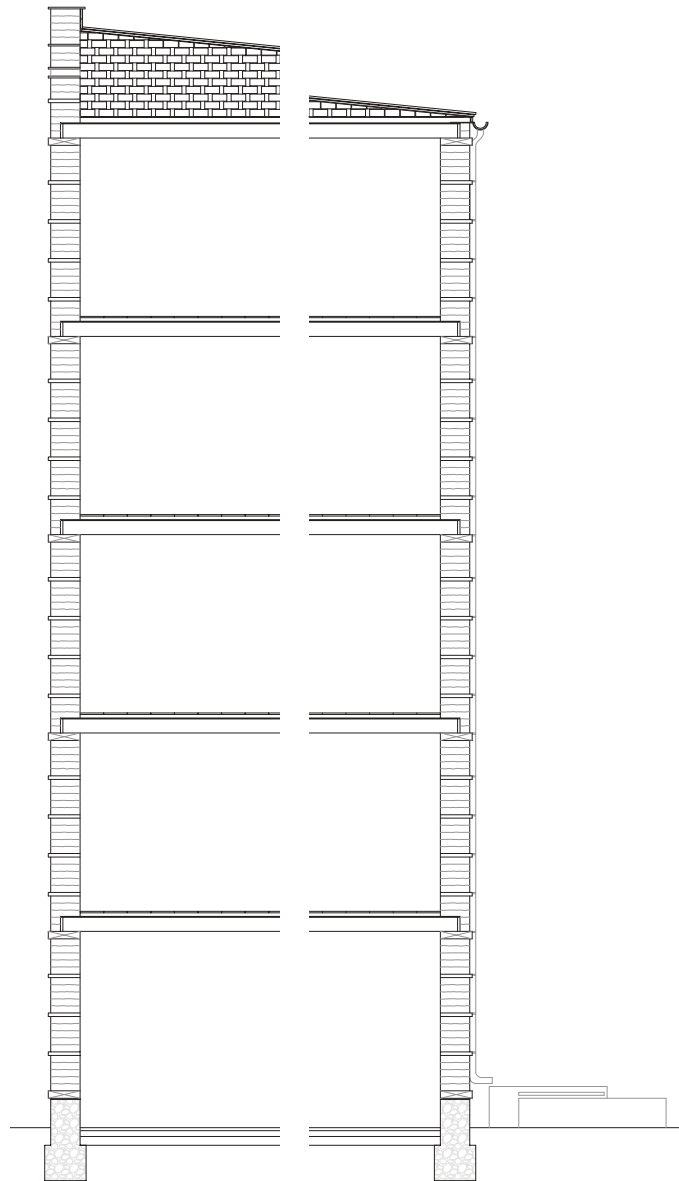


Fig.87,88 Detall del mobiliari pensat per a recollir l'aigua de pluja.

Té tant funció urbanística com d'emmagatzematge per al posterior ús de l'aigua.

Fig.89 Secció general.

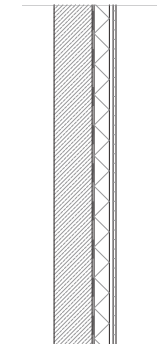
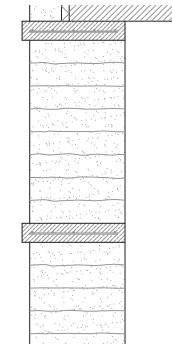
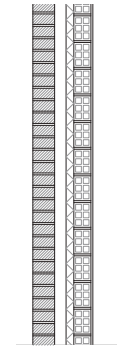
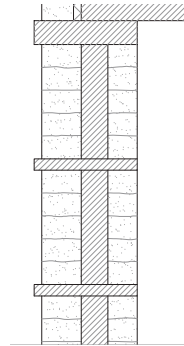
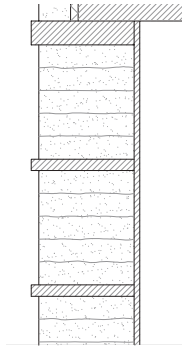
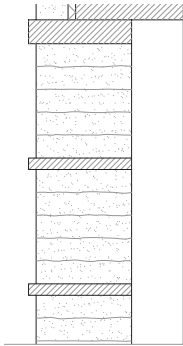
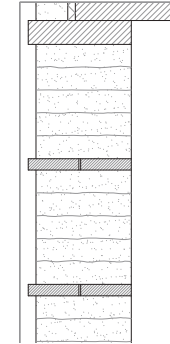


A manera de resum, no s'ha d'oblidar que l'objectiu d'aquest estudi és caminar cap a solucions de projectes residencials de densitat raonada a partir de materials low-tech. La finalitat, també ha de ser fer un ús òptim dels recursos pròxims al projecte com són els materials i treballadors de la zona; així com aprofitar els recursos naturals del Sol i la pluja.

A la secció general, he considerat adient l'ús de la coberta inclinada per facilitar la recollida de les aigües pluvials que permeten el seu reciclatge com a aigua de reg per al pati comunitari.

Com a conclusió final de l'apartat de construcció amb terra compactada, he realitzat una comparativa de diversos detalls constructius de tancament. L'anàlisi del tancament és conseqüència de ser un dels elements més representatius del caràcter d'un edifici, així com per tractar-se d'una de les parts de l'envolvent que presenta majors pèrdues d'energia, estimades al voltant del 25%.

Es comparen les tres solucions aportades, dos alternatives de construcció amb terra compactada inspirades en els casos d'estudi, i dos solucions més convencionals.



1a columna

Fig.90 Vivenda a Sòria.
Fig.91,92,93 Tancaments tipus 1a,1b,1c.

Fig.94 Casa Entre Muros, Al Borde.

Fig.95 Tancament tipus 2.

2a columna

Fig.96 Castell de Pilas Bonas a Manzanares.

Fig.97 Tancament tipus 3.

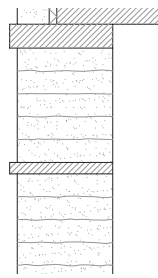
Fig.98 Bloc d'apartaments a Maastricht.

Snozzi+Vacchini, Locarno.

Fig.99 Tancament tipus 4.

Fig.100 Universitat Tècnica de Graz. Riegler Riewe.

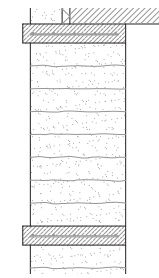
Fig.101 Tancament tipus 5.



tancament tipus 1a

tancament de terra compactada amb biga corona de fusta i reforços horitzontals de fusta cada 60 cm (5 capes de terra).

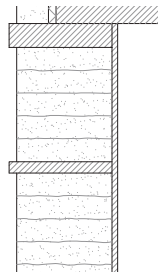
| ELEMENTS | UNITATS | ENERGIA INCORPORADA (MJ/unitat) | EI (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂ /unitat) | PC(kg eq CO ₂) |
|----------------------------------|---------|---------------------------------|----------------|--|----------------------------|
| fusta laminada (m ²) | 0,123 | 3578,000 | 438,305 | 662 | -81,095 |
| terra (m ²) | 0,878 | 158,000 | 138,645 | 9,7 | 8,512 |
| TOTAL | | | 576,950 | | -72,583 |



tancament tipus 2

tancament de terra compactada amb biga corona de formigó i reforços horitzontals de formigó cada 96 cm (8 capes de terra).

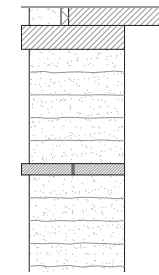
| ELEMENTS | UNITATS | ENERGIA INCORPORADA (MJ/unitat) | EI (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂ /unitat) | PC(kg eq CO ₂) |
|---|---------|---------------------------------|----------------|--|----------------------------|
| formigó in situ (m ²) | 0,100 | 1549,000 | 154,900 | 251 | 25,1 |
| terra (m ²) | 0,900 | 158,000 | 142,200 | 9,7 | 8,73 |
| mal·la d'acer com a reforç del formigó (kg) | 4,838 | 13,000 | 62,894 | 0,83 | 4,016 |
| TOTAL | | | 359,994 | | 37,846 |



tancament tipus 1b

tancament de terra compactada amb biga corona de fusta i reforços horitzontals de fusta cada 60 cm (5 capes de terra). Reforços verticals de fusta exteriors cada 1.2 m.

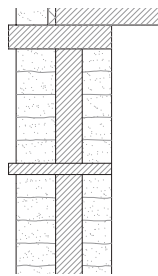
| ELEMENTS | UNITATS | ENERGIA INCORPORADA (MJ/unitat) | EI (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂ /unitat) | PC(kg eq CO ₂) |
|----------------------------------|---------|---------------------------------|----------------|--|----------------------------|
| fusta laminada (m ²) | 0,128 | 3578,000 | 456,911 | 662 | -84,537 |
| terra (m ²) | 0,872 | 158,000 | 137,823 | 9,7 | 8,463 |
| TOTAL | | | 594,734 | | -76,074 |



tancament tipus 3

tancament de terra compactada amb biga corona de fusta i filades de rajola massissa cada 60 cm (5 capes de terra).

| ELEMENTS | UNITATS | ENERGIA INCORPORADA (MJ/unitat) | EI (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂ /unitat) | PC(kg eq CO ₂) |
|-----------------------------------|---------|---------------------------------|----------------|--|----------------------------|
| fusta laminada (m ²) | 0,063 | 3578,000 | 223,625 | -662 | -41,375 |
| terra (m ²) | 0,878 | 158,000 | 138,645 | 9,7 | 8,512 |
| rajola massissa (m ²) | 0,060 | 1663,000 | 99,780 | 107 | 4,420 |
| TOTAL | | | 462,050 | | -26,443 |



tancament tipus 1c

tancament de terra compactada amb biga corona de fusta i reforços horitzontals de fusta cada 60 cm (5 capes de terra). Reforços verticals de fusta interiors cada 1.2 m.

| ELEMENTS | UNITATS | ENERGIA INCORPORADA (MJ/unitat) | EI (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂ /unitat) | PC(kg eq CO ₂) |
|----------------------------------|---------|---------------------------------|----------------|--|----------------------------|
| fusta laminada (m ²) | 0,135 | 3578,000 | 482,314 | 662 | -89,238 |
| terra (m ²) | 0,865 | 158,000 | 136,702 | 9,7 | 8,392 |
| TOTAL | | | 619,016 | | -80,845 |

solucions amb terra compactada

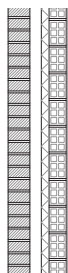
avantatges

- _labor intensiva
- _inèrcia tèrmica i aïllament acústic
- _difusió de vapor, humitats relatives constants
- _facilitat de reciclatge
- _productes més barats

desavantatges

- _major manteniment
- _menor normalització

Fig.102,103,104,105,106
Anàlisi de les solucions amb terra compactada.

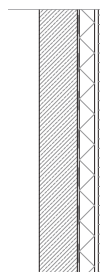


tancament tipus 4

tancament convencional de rajola caravista de 1/2 peu, seguit de càmera d'aire de 6 cm, aïllant de polièstiré extruït de 4 cm, rajola del 9 i enlluït de ciment.

| ELEMENTS | LIMITATS | ENERGIA INCORPORADA (MJ/unitat) | EI (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂ /unitat) | PC (kg eq CO ₂) |
|--------------------------------------|----------|---------------------------------|-----------------|--|-----------------------------|
| rajola caravista (m ²) | 0,365 | 1485,000 | 542,025 | 95 | 34,675 |
| aïllament de polièstiré extruït (kg) | 4,697 | 107,100 | 503,040 | 3,73 | 17,520 |
| càmera d'aire (m ³) | 0,190 | 0,000 | 0,000 | 0 | 0 |
| rajola buada (m ²) | 0,286 | 742,500 | 212,355 | 47,5 | 13,585 |
| enlluït de ciment (m ²) | 0,032 | 2161,000 | 69,152 | 309 | 12,448 |
| TOTAL | | | 1326,581 | | 78,228 |

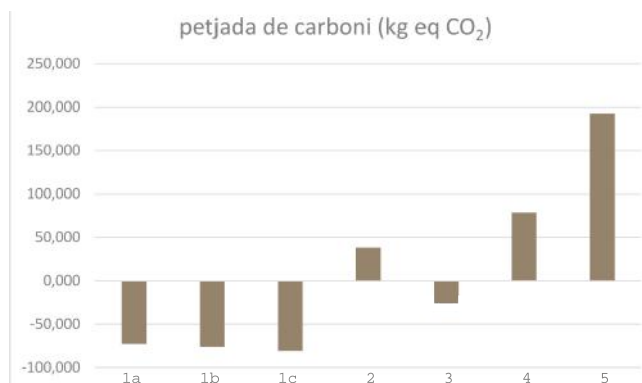
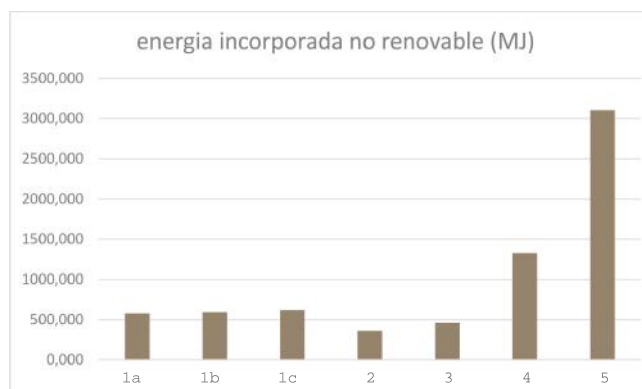
| TANCAMENT | ENERGIA INCORPORADA NO RENOVABLE (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂) |
|-----------|---------------------------------------|---|
| 1a | 576,95 | -72,583 |
| 1b | 594,734 | -76,076 |
| 1c | 619,016 | -80,845 |
| 2 | 359,994 | 37,846 |
| 3 | 462,05 | -26,443 |
| 4 | 1326,581 | 78,228 |
| 5 | 3101,612 | 192,492 |



tancament tipus 5

tancament formigó vist (20 cm), seguit de làmina bituminosa, aïllament de vidre cel·lular de 8 cm i tauler de fibra de densitat mitjana (MDF) d'1,5 cm.

| ELEMENTS | LIMITATS | ENERGIA INCORPORADA (MJ/unitat) | EI (MJ) | PETJADA DE CARBONI (kg eq CO ₂ /unitat) | PC (kg eq CO ₂) |
|--|----------|---------------------------------|-----------------|--|-----------------------------|
| formigó in situ (m ³) | 0,635 | 1549,000 | 983,305 | 251 | 159,335 |
| malta d'acer com a reforç del formigó (kg) | 21,236 | 13,000 | 275,938 | 0,83 | 37,618 |
| làmina bituminosa (kg) | 17,457 | 45,600 | 796,039 | 0,37 | 6,49309 |
| aïllament de vidre cel·lular (kg) | 26,666 | 21,300 | 581,323 | 1,26 | 33,599 |
| MDF (m ²) | 0,048 | 9767,000 | 465,007 | -515 | -24,519 |
| TOTAL | | | 3101,612 | | 192,492 |



solucions convencionals

avantatges

- _aïllament tèrmic i acústic
- _major confiança actualment
- _elements reutilitzables (rajola, MDF...)

desavantatges

- _productes més cars
- _menys labor intensiva
- _dificultat reciclatge

Fig.107,108 Anàlisi de dos solucions convencionals. Fig.109,110,111 Comparativa de l'energia incorporada no renovable i la petjada de carboni del conjunt de solucions.

Cal remarcar que per a l'anàlisi elaborat s'ha tingut en compte 1 m³ de tancament i que l'energia incorporada de totes les gràfiques és la corresponent a l'energia incorporada no renovable. Les dades d'energia incorporada i petjada de carboni han sigut extretes de fonts diverses⁴⁴, de forma que els resultats obtinguts han de valorar-se com a resultats aproximats.

No obstant, sí que s'observa una menor energia incorporada a les solucions de terra compactada (1,2,3) en comparació a les solucions convencionals (4,5). Les solucions més normalitzades, sobretot la façana de formigó vist, mostren valors significativament alts d'energia incorporada no renovable i de petjada de carboni respecte a la resta.

El motiu de l'ús de fusta laminada per a bigues i reforços és per la importància d'aquesta indústria a l'Estat espanyol. Així, els desplaçaments necessaris són reduïts i es fomenta el desenvolupament econòmic nacional. Tanmateix, és cert que aquest producte disposa d'una energia incorporada no renovable

44 HEGGER, M. et al. (2006). *Construction materials manual*. Munich: Birkhäuser.

PFUNDSTEIN, M., et al. (2007). *Insulating materials: principles, materials, applications*. München: Detail.

notablement alta. Encara així, l'ús d'aquesta fusta té efectes beneficiosos ja que té valors de petjada de carboni negatius. Açò és conseqüència dels gasos absorbits pels arbres durant la seua vida prèvia a utilitzar-se com a material de construcció.

S'observa que amb l'augment de volum de fusta laminada a les diferents solucions s'incrementa el valor negatiu de la petjada de carboni.

Per altra banda, cal destacar que les solucions de formigó armat solen importar l'acer necessari, amb la qual cosa creixen les externalitats negatives. Per tant, en cas d'elegir aquesta solució caldria fer un esforç per promocionar la indústria siderúrgica nacional.

de les conclusions.

En definitiva, l'ús dels materials low-tech sembla estar àmpliament justificat. Queda pendent l'avanç en la reinterpretació d'aquests materials tradicionals a l'arquitectura contemporània. No obstant, l'avanç està a les nostres mans.

8. BIBLIOGRAFIA

_llibres i revistes

Arquitectura Viva (2009), vol.128, Hormigón sostenible. Madrid: Arquitectura Viva SL

Arquitectura Viva (2011), vol.137, Más madera. Madrid: Arquitectura Viva SL

Arquitectura Viva (2013), vol.151, Materia local. Madrid: Arquitectura Viva SL

BERGE, B. (2009). *The ecology of building materials*. Oxford: Architectural Press.
<http://ecobooks.greenharmonyhome.com/wp-content/uploads/ecobooks/Ecology_of_Building_Materials_Second_Edition.pdf> [Consulta: 7 de març de 2016]

BOLTSHAUSER, R. et al. (2011). *The Rauch House: a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser.

CRATERre-ENSAG et al. (2008). *Terra incognita: discovering european earthen architecture*. Portugal: Argumentum.

HEGGER, M. et al. (2006). *Construction materials manual*. Munich: Birkhäuser.

MILETO, C., i VEGAS, F. (2014). *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. València: General de Ediciones de Arquitectura.

MINGUET, J.M. (2010). *Low-Tech architecture*. Barcelona: Monsa.

PFUNDSTEIN, M., et al. (2007). *Insulating materials: principles, materials, applications*. München: Detail.

RAUCH, M., KAPFINGER, O. i SAUER, M. (2015). *Martin Rauch: refined earth construction and design with rammed earth*. München: Detail.

SCHUMACHER, E.F. (2001). *Lo pequeño es hermoso*. Madrid: Tres cantos

_altres: articles, apunts i tesi.

BUI, Q.B. et al. (2009). "Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering" a *Building and Environment*, vol. 44, 912-919

BUI, T.T. et al. (2014). "Failure of rammed earth walls: from observations to quantifications" a *Construction and Building Materials*, pp.295-302.
<hal-00918221>

Criterios de sostenibilidad aplicables al planeamiento urbano. <<http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0528797.pdf>>
[Consulta: 17 de maig de 2016]

FONT, F. i HIDALGO, P. (2011). "La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos" a *Informes de la Construcción*, vol. 63, 523, 21-34.

LILLO NAVARRO, M. (2015). *Sin recursos: el paradigma de la escasez como principio creativo en el proyecto arquitectónico*. Tesis doctoral no

publicada. Universitat Politècnica de València, <<http://hdl.handle.net/10251/59226>> [Consulta: 11 de febrer de 2016]

LLORCA PONCE, A. (2011) Apunts *Economía medioambiental y desarrollo sostenible*. ETSAV.

MEJÍA, J.M., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. i PUERTAS, F. (2013). "Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente" a *Materiales de Construcción*, vol. 63, 311, 361-375.

RIGASSI, V. i CRATERRE-EAG (1985). *Compressed earth blocks: manual of production*. Alemanya: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE. <<http://www.ecohabitar.org/wp-content/uploads/2012/01/04-57921.pdf>> [Consulta: 15 de juny de 2016]

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2009). *Buildings and Climate Change. Summary for Decision-Makers*. <<http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

ZHANG, M. et al. (2013). "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer" a *Construction and Building Materials*, vol. 47, 1468-1478.

_webs

AL BORDE <http://www.albordearqu.com/nosotros_us/#/quienes-somos_who-we-are> [Consulta: 9 de juny de 2016]

LEHM TON ERDE <<http://www.lehmtonerde.at/en/martin-rauch/>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

PLATAFORMA ARQUITECTURA. <<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-25319/casa-entre-muros-al-borde>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

WIKIPEDIA <https://en.wikipedia.org/wiki/Urban_sprawl> [Consulta: 17 de maig de 2016]

_conferències i ponències de congrés.

COSA, J. et al. (2016) "Estabilización de suelos con cementos activados alcalinamente: Una solución más sostenible para la construcción de viviendas en países en desarrollo" a *III Congreso de Estudios de Desarrollo*, Saragossa. 29 de juny a l'1 de juliol de 2016

TED. <https://www.ted.com/talks/teddy_cruz_how_architectural_innovations_migrate_across_borders> [Consulta: 17 de maig de 2016]

_relació de figures

Portada, Fig.28 LEHM TON ERDE <<http://www.lehmtonerde.at/en/>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.1 *Arquitectura Viva* (2011), vol.137, Más maderas. Madrid: Arquitectura Viva SL

Fig.2,47-51 MINGUET, J.M. (2010). *Low-Tech architecture*. Barcelona: Monsa.

Fig.3 PLATAFORMA ARQUITECTURA
<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-82785/piscina-interior-en-toro-vier-arquitectos>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig. 4, 15, 83-89, 91-93, 95, 97, 99, 101-111
Elaboració de l'autora.

Fig.5,6 ARCHDAILY
<<http://www.archdaily.com/274835/casia-coop-training-centre-tyin-tegnestue-architects>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.7 ANNA HERINGER <<http://www.anna-heringer.com>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.8 Reelaboració de l'autora. Font: PINTEREST
<<https://es.pinterest.com/pin/343751384031008286/>> [Consulta: 5 de juliol de 2016]

Fig.9,10 *Arquitectura Viva* (2013), vol.151, Materia local. Madrid: Arquitectura Viva SL

Fig.11 ARCHDAILY
<<http://www.archdaily.com/51767/friendhouse-hotel-ryntovt>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.12-14,98,100 HEGGER, M. et al. (2006). *Construction materials manual*. Munich:

Birkhäuser.

Fig.16 TYIN TEGNESTUE ARCHITECTS
<<http://www.tyinarchitects.com/works/soe-ker-tie-house/>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.17,19-21 PLATAFORMA ARQUITECTURA
<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/626337/escuela-nueva-esperanza-al-borde>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.18,45,46,52,54,55,94 PLATAFORMA ARQUITECTURA
<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-25319/casa-entre-muros-al-borde>> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.22 TED <https://www.ted.com/talks/teddy_cruz_how_architectural_innovations_migrate_across_borders> [Consulta: 17 de maig de 2016]

Fig.23 THE AMERICAN ACADEMY OF DRAMATIC ARTS
<<https://www.aada.edu/campuses/new-york-campus-overview>> [Consulta: 17 de maig de 2016]

Fig.24 BOSTON.COM
<http://archive.boston.com/bigpicture/2010/09/human_landscapes_in_sw_florida.html> [Consulta: 17 de maig de 2016]

Fig.25 MEGACONSTRUCCIONES.NET <<http://megaconstrucciones.net/?construccion=gran-muralla-china>> [Consulta: 5 de juliol de 2016]

Fig.26 GONZALO SÁNCHEZ, V. (2016) "Arquitectura comprometida"

<<http://arquitecturacomprometida.blogspot.com.es/search/label/Arquitectura%20de%20Tierra>> [Consulta: 5 de juliol de 2016]

Fig.27 WIKIPEDIA <<https://en.wikipedia.org/wiki/Weilburg>> [Consulta: 5 de juliol de 2016]

Fig.29-43 BOLTSHAUSER, R. et al. (2011). *The Rauch House: a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser.

Fig.44 AL BORDE <http://www.albordearq.com/nosotros_us/#/quienes-somos_who-we-are> [Consulta: 9 de juny de 2016]

Fig.53 Estudi Al Borde.

Fig.56,57 BUI, Q.B. et al. (2009). "Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering" a *Building and Environment*, vol. 44, 912-919

Fig.58 RIGASSI, V. i CRATerre-EAG (1985). *Compressed earth blocks: manual of production*. Alemanya: Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien-GATE. <<http://www.ecohabitar.org/wp-content/uploads/2012/01/04-57921.pdf>> [Consulta: 15 de juny de 2016]

Fig.59-61 MEJÍA, J.M., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. i PUERTAS, F. (2013). "Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente" a *Materiales de Construcción*, vol. 63, 311, 361-375.

Fig.62-64 ZHANG, M. et al. (2013). "Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer" a *Construction and Building Materials*, vol. 47, 1468-1478.

Fig.65-68 Fotografies de l'autora.

Fig.69-72 COSA, J. et al. (2016) "Estabilización de suelos con cementos activados alcalinamente: Una solución más sostenible para la construcción de viviendas en países en desarrollo" a *III Congreso de Estudios de Desarrollo*, Saragossa. 29 de juny a l'1 de juliol de 2016

Fig.73-75 RAUCH, M., KAPFINGER, O. i SAUER, M. (2015). *Martin Rauch: refined earth construction and design with rammed earth*. Múnich: Detail.

Fig.76-79,96 MILETO, C., i VEGAS, F. (2014). *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. València: General de Ediciones de Arquitectura.

Fig.80-81,90 CRATerre-ENSAG et al. (2008). *Terra incognita: discovering european earthen architecture*. Portugal: Argumentum.

Fig.82 Reelaboració de l'autora. Font: RAUCH, M., KAPFINGER, O. i SAUER, M. (2015). *Martin Rauch: refined earth construction and design with rammed earth*. Múnich: Detail.