

MÀSTER UNIVERSITARI EN EDIFICACIÓ
TREBALL DE FI DE MÀSTER

ANÀLISI DE LA CONSTRUCCIÓ ACTUAL REALITZADA AMB
BALES DE PALLA COMBINADES AMB MATERIALS PRIMARIS.
EL CAS DE MALLORCA

Estudiant/s: **Francesc Serra Cantalops**
Director/s: Agustí Portales Pons
Convocatòria: Octubre 2012

RESUM

Aquest treball de fi de màster pretén donar a conèixer l'ús de la palla, principalment en forma de bala, com a material de construcció complementat amb altres materials d'origen natural que, en conjunt, formen una alternativa de construcció sostenible. Es fa un anàlisi tant de la vessant d'execució com de les propietats i el comportament dels materials i del sistema constructiu.

Posteriorment, a partir de l'estudi d'un habitatge construït amb tancaments realitzats amb bales de palla s'extreuen algunes conclusions en relació al seu cost econòmic, la seva execució i l'aïllament tèrmic.

ABSTRACT

This Masters project aims to introduce the use of straw, mostly in bale form, as a building material, supplemented with natural materials, which collectively form an alternative and sustainable building. It will cover both aspects of techniques construction and material's behavior and properties.

Finally from the analysis of a straw bale house, it draws some conclusions related to the costs and the thermal performance of this type of building.

ÍNDIX

1. Introducció.....	5
2. Què caracteritza les construccions realitzades amb bales de palla?.....	6
3. Quins factors s'han de tenir en compte en relació a les bales de palla?.....	8
4. Principals consideracions en l'execució de murs.....	9
5. Murs de càrrega o tancaments de bales de palla?.....	12
6. Comportament dels murs realitzats amb bales de palla.....	13
6.1. Resistència a compressió.....	14
6.2. Resistència a l'acció del vent.....	14
6.3. Comportament front al sisme.....	15
6.4. Resistència al foc.....	15
6.5. Comportament enfront a la humitat.....	15
6.6. Comportament tèrmic.....	16
6.7. Comportament enfront a l'atac d'insectes i d'altres organismes.....	17
7. Impacte mediambiental de les "cases de palla".....	18
7.1. Energia incorporada.....	18
7.2. Emissions de CO ₂	19
7.3. Reciclatge potencial.....	20
8. La vida útil les construccions i el seu manteniment.....	21
9. Les cases de palla i la normativa.....	21
10. Estudi d'un cas real.....	23
10.1. Consideracions del disseny i l'execució.....	23
10.2. Estudi econòmic.....	24
10.3. Superfície útil.....	34
10.4. Aïllament tèrmic.....	34
Conclusions.....	37
Bibliografia.....	39

1. Introducció

La crisi econòmica actual, que ha afectat especialment al sector de la construcció, juntament amb l'evident canvi climàtic ens obliguen a replantejar el model constructiu vigent i a pensar en la possibilitat d'introduir idees noves que puguin ser una alternativa vàlida al monopoli del formigó, l'acer, el "totxo" i als altres materials poc sostenibles que han imperat durant les darreres dècades. L'aprofitament dels recursos naturals, la reducció de petjada ecològica i del consum energètic són alguns del principis en que s'han de fonamentar aquestes noves construccions.

Aquest treball neix de la curiositat envers a la construcció sostenible i, particularment, entorn a un material tan peculiar com alhora sorprenent com és la palla. A primer cop d'ull sembla un producte dèbil i de poca durabilitat però en les condicions adequades i en combinació amb els materials adequats s'obté un element constructiu de prestacions estructurals, aïllants i biòtiques notables.

L'ús de bales de palla per a la formació de tancaments i, sobretot per a murs de càrrega, encara es troba en una fase molt primerenca i, en general, resulta força estrany i desconegut per bona part dels tècnics i constructors i encara més als promotors i a la població en general. És habitual sentir el comentari en to de burla: *Casa de palla? Com la dels tres porquets i el llop?*. En aquest sentit, aquest treball pretén servir com a element de divulgació i alhora d'autoaprenentatge en relació a aquest estil constructiu i a les seves possibilitats. És important que es deixin al marge els tòpics o prejudicis i s'obri la ment a noves formes d'entendre la construcció. Aquest treball només és la primera passa per a impulsar noves investigacions i assajos més profunds i específics que desenvolupin totes les potencialitats d'aquest interessant material.

L'ús de bales de palla en la construcció no és un sistema perfecte o ideal; com qualsevol altre solució constructiva, suposa inconvenients i problemes que s'han de tenir en compte per a poder-los evitar o si més no, reduir tant com sigui possible. L'anàlisi d'aquestes inconvenients i les possibles accions de millora seran un dels objectius principals d'aquest treball.

Qualsevol construcció, sigui del material que sigui, requereix una anàlisi tècnica que doni validesa als materials que s'utilitzen i que verifiqui que es compliran els requeriments normatius. Per tant, a més de conèixer com es construeix és molt important investigar i aprofundir en el seu comportament i en les seves característiques tècniques. En el cas dels habitatges realitzats amb bales de palla s'estudiarà el compliment del Codi Tècnic de l'Edificació.

A nivell econòmic, la idea d'autoconstruir-se el teu propi habitatge pot resultar força interessant si es té en compte que la major part del cost d'un edifici es concentra en la mà d'obra. De fet, en una situació econòmica en que la manca de treball és cada vegada major, pot resultar una opció interessant si es disposa del suport tècnic i dels coneixements necessaris. La viabilitat econòmica és un dels punts més importants a nivell pràctic i serà important analitzar-la juntament amb la qualitat i el temps d'execució, els quals formen els paràmetres principals d'una projecte de construcció.

1.1. Estructura del treball

Així com s'ha anat investigant i desenvolupant el contingut d'aquest TFM, la gran quantitat d'informació acumulada ha obligat a haver d'incloure annexes. A fi de facilitar la lectura del treball i d'extreure'n una idea global, el cos del treball inclou una síntesi dels principals aspectes referents a les construccions realitzades amb bales de palla i a les conclusions extretes. Posteriorment aquestes qüestions s'amplien en els diferents annexes els quals reforcen les idees que s'han plantejat en el cos del treball. Per tant, per a una millor compressió del treball és important complementar la lectura d'aquest document amb cadascun dels annexes amb els quals es relaciona.

2. Què caracteritza les construccions realitzades amb bales de palla?

Es coneix col·loquialment amb el nom de "casa de palla" a aquella construcció en la que els murs (exterior, principalment) s'han realitzat, total o parcialment, a base de bales de palla. Les bales es col·loquen a trencajuntes i posteriorment es revesteixen a banda i banda amb morter o algun altre material resistent i protector.

Existeixen bàsicament dos sistemes constructius en que s'utilitzen les bales de palla: els murs de càrrega i els tancaments. En els primers, el conjunt de bales i els revestiments ha de suportar totes les accions verticals i horitzontals que actuen en la construcció. Els tancaments són la solució més emprada ja que la capacitat portant recau en una estructura auxiliar (normalment a base de fusta).

- Construcció sostenible

La construcció amb bales de palla s'engloba dins la idea de la construcció sostenible, també anomenada bioconstrucció. Aquesta forma d'entendre la construcció es basa en sèrie de principis: l'aprofitament de recursos natural i renovables, l'ús de materials reutilitzables o reciclables i biodegradables, un disseny bioclimàtic amb una distribució racional dels espais i la integració de la construcció en el seu entorn. Tot això, destinat a reduir la petjada ecològica i el consum energètic de la construcció i a aconseguir construccions lliures de materials nocius per al medi ambient i per als seus habitants.

L'ús de bales de palla en la construcció s'integra perfectament en aquesta filosofia constructiva. Per una banda, l'elevada producció cerealística obliga a cercar noves solucions per aprofitar els milions de tones de palla que es produeixen anualment. Per tant, l'ús de les palla en la construcció és una via d'aprofitament a tenir molt en compte ja el seu cost és mínim i la seva disponibilitat és molt elevada. A més, les bales de palla compleixen els requisits d'un material sostenible: són un producte natural, renovable, biodegradable i reutilitzable.

D'altra banda, la palla en combinació amb els materials de revestiment adquireixen bones propietats tèrmiques i higroscòpiques que juntament amb l'ús d'energies renovables i de sistemes

de condicionament passius afavoreixen l'assoliment de construccions confortables i energèticament eficients.

Pel que fa a la reducció de la petjada ecològica de la construcció, es segueixen dues normes bàsiques: utilitzar materials naturals que requereixin poca energia incorporada (morters de fang, fustes certificades o reciclades, aïllaments a base suro, lli ,etc) i aprofitar, sempre que es pugui, els materials que es tinguin més a prop evitant el transport de productes des de grans distàncies.

- Complementació de la palla

Cal deixar clar des del principi que les bales de palla per sí soles no disposen de les qualitats suficients per formar un mur de càrrega, un tancament, una coberta,etc. Les propietats de la palla s'han de complementar amb les d'altres materials a fi d'obtenir un element constructiu que resisteixi les càrregues, l'acció dels agents atmosfèrics, sigui resistent al foc... i, en general, que compleixi tots els requeriments que li siguin exigits.

Entre els materials que es poden combinar amb les bales de palla destaquen aquells que per la seva condició de naturals i per les seves propietats complementàries a les de la palla permeten assolir una construcció sostenible en tots els aspectes. L'argila, la fusta i la calç són els més habitualment emprats. Aquests i d'altres materials naturals d'ús menys estès s'introdueixen en l'Annex 2.

A més de les propietats físiques, aquests materials presenten unes propietats difícils de quantificar però suposen un gran benefici per a l'edifici com la capacitat d'absorbir els tòxics de l'argila, el poder de desinfecció de la calç o la sensació de calidesa i de benestar que transmet la fusta.

- Els revestiments, element clau

Els revestiments tenen una gran importància en els diferents aspectes del comportament dels murs de bales de palla que el converteixen en l'element bàsic d'aquests tipus de construccions. A nivell estructural, resisteixen la gran majoria de càrregues gravitatòries (en murs de càrrega) i col·laboren en la distribució de les càrregues laterals; confinen la palla i la protegeixen front a la humitat, al foc i a d'altres agents de degradació conferint-li una notable durabilitat. A més col·labora en l'aïllament tèrmic i acústic del mur gràcies a la seva important inèrcia a més de tenir un paper fonamental en el comportament higroscòpic dels murs. Vegeu el seu comportament a l'Annex 6.

Una propietat molt important és la permeabilitat al vapor o transpiració del revestiment. La bala requereix una bona ventilació al seu voltant per mantenir-se en perfecte estat. A la pràctica, això significa que tant els revestiments estructurals com d'acabat han de regular el nivell d'humitat entre l'interior i l'exterior.

3. Quins factors s'han de tenir en compte en relació a les bales de palla?

La palla degut a la seva composició lignocel·lulosa i l'estructura tubular de les fibres presenta propietats útils per a ser emprada en la construcció (aïllament tèrmic, absorció de moviments sísmics, resistència al foc). No obstant, com ocorre als materials cel·lulosos, en condicions adverses, especialment en humitats elevades, la seva durabilitat es redueix i les seves propietats es veuen notablement afectades.

La bales de palla no és, en un principi, un producte fabricat per a finalitats constructives i, en general, no presenten el grau d'homogeneïtat ni la fiabilitat d'altres materials de fàbrica com un maó, un bloc de formigó o una rajola. Per aquest motiu, les seves propietats físiques i mecàniques poden variar de forma ostensible si no es controla el seu procés d'elaboració i emmagatzematge. És a dir, no totes les bales poden ser vàlides per a la construcció. Per tant, serà important realitzar un control de qualitat durant la producció d'aquestes i abans de la seva col·locació a obra. S'haurà de prestar especial atenció a diversos aspectes: el grau de compactació de la bala (densitat), el contingut d'humitat, la presència de residus orgànics i el correcte fermat de la bala.

La **humitat** és el principal enemic de la palla. En percentatges elevats (superiors al 18% en massa) i en combinació amb restes orgàniques, la palla incrementa el risc de descomposició. Serà important controlar les condicions d'emballatge i d'emmagatzematge de les bales a fi d'obtenir bales en bones condicions i el més seques possible.

El **grau de compactació i de fermat** són bàsics en el comportament resistent i la deformació de les bales, especialment quan formen part de murs de càrrega. En aquest cas són recomanables densitats superiors als 100kg/m^3 . És important emprar elements de fermat que no es degradin i que no perdin tensió amb el temps (per exemple, les cordes de polipropilè).

El **tipus de palla** en general no afecta de forma considerable a les propietats de les bales encara que alguns tipus són més ben considerats que d'altres. La palla d'arròs destaca per a la seva resistència a la putrefacció. L'ús d'un tipus de bala a un altre dependrà en gran mesura de la disponibilitat en la zona propera a la construcció.

Les grans **dimensions de les bales** no es poden comparar a cap dels elements utilitzats en la formació de murs convencionals. Trobem des de bales de dues cordes d'uns 45cm d'amplada i uns 90cm de llarg fins a les bales jumbo que poden assolir fins a 1m de gruix i 3m de longitud. D'una banda, pel fet de ser elements de grans dimensions i força lleugers, agilitzen el procés de col·locació i el gruix de la bala incrementa la capacitat aïllant del mur. Per contra, suposen una pèrdua de superfície útil considerable que repercuteix en el preu final de la construcció. Més endavant analitzarem aquest condicionant en un cas real. En relació a aquest aspecte té especial rellevància la possibilitat de col·locar la bala de cantell i reduir així el gruix del mur o tancament. De fet, les dimensions de les bales condicionaran tant el seu procés de col·locació com el comportament dels elements constructius.

- Com es podrien millorar les bales?

Tenint en compte els factors esmentats anteriorment, per a garantir i millorar les seva qualitat caldrà incidir en el procés d'obtenció de la palla i en l'elaboració de les bales.

Per començar, cal establir un procediment per al control de qualitat de les bales. Seria important seguir el camí de països europeus com Alemanya, on s'ha aconseguit que es reconeixin les bales de palla com a material per a la construcció sempre que compleixin les exigències descrites per l'organisme encarregat del control, el FASBA, un gremi tècnic especialista en construcció amb bales de palla. D'aquesta manera, una vegada superat el control, el producte obté un certificat que garanteix la seva bona qualitat.

Per optimitzar aquest procés i homogeneïtzar les bales resultants, s'hauria de incrementar la cooperació entre agricultors i productors de cereals i els constructors en la compravenda de bales per intentar treure un benefici mutu. D'aquesta manera, els constructors poden disposar de bales de qualitat (de bona densitat, seques i de dimensions adequades) i alhora els productors de cereal obtenen ingressos extres a partir d'un producte residual.

L'emalatge de la palla en espais on hi hagi un control exhaustiu de les condicions ambientals, especialment de la densitat ambiental, i es permeti verificar el perfecte estat de la palla, neta de restes orgàniques, suposaria un passa endavant important. Alguns accions per a la seva millora poden ser: la compactació amb embaladores industrials de gran potència o l'ús de màquines d'assecat per reduir al màxim el contingut d'humitat. L'aplicació de productes químics per a millorar les propietats de la palla no sembla la millor opció atès que tot el que s'aplica a la palla posteriorment s'introdueix en l'ambient interior de la construcció i pot ser perjudicial pels seus habitants. Com a alternativa natural, s'utilitzen els banys de calç per a millorar la durabilitat de la palla i la resistència a la putrefacció i els banys de fang per a millorar la cohesió i la resistència al foc.

Per a poder arribar a un desenvolupament industrial de la producció seria necessària una demanda de bales de palla important que permetés als productors de cereal amortitzar el temps i la maquinària dedicats a controlar les condicions de producció i emmagatzematge de les bales. A dia d'avui el més normal és l'establiment d'acords entre petits agricultors i constructors locals per a la compra d'un nombre reduït de bales.

4. Principals consideracions en l'execució dels murs realitzats amb bales de palla

La construcció amb bales de palla ha evolucionat fins a l'actualitat a partir de la prova continuada de materials i de mètodes d'execució. El fet de no disposar d'una normativa o d'un manual unificat a seguir ha generat una gran riquesa en la tècnica i en recursos utilitzats a cada regió. En tots el casos els mètodes utilitzats s'adapten a les condicions del lloc i als recursos de que es disposa.

Dins cada estil constructiu els mètodes i el disseny són molt diversos però sempre acostumen a incloure el mateixos elements principals i es tenen en compte una sèrie de principis que garanteixen un correcte procés d'execució i producte final de bona qualitat.

- Rapidesa de muntatge

Un dels punts més destacables en l'ús de les bales de palla és la facilitat en la seva manipulació i col·locació que permet l'execució de murs amb gran rapidesa i que no es requereixen grans coneixements per a la col·locació de les bales; l'autoconstrucció és el sistema de treball més habitual des dels seu inicis.

És fonamental que s'hagi realitzat un disseny adequat que eviti excessives operacions de modificació de les bales i una preparació prèvia dels elements que formaran el mur (bastiments, anell de coronació, reforços, etc) de manera que el ritme de l'obra sigui continu. Com en qualsevol obra serà important també fer una correcta previsió dels materials de manera que totes les fases es realitzin el més ràpid possible.

- La humitat, el principal perill

La humitat és l'element generador de més problemes en aquest tipus de construccions. La palla amb un elevat percentatge d'humitat perd bona part de les seves propietats aïllants i estructurals i és susceptible a la descomposició degut a l'atac de microorganismes.

Ja sigui humitat provinent de la pluja com del terreny o de les instal·lacions és essencial garantir que les bales es mantinguin seques o que, en cas d'entrar en contacte amb l'aigua, s'eixuguin amb rapidesa. Serà important mantenir les principals fonts d'humitat el més allunyades possible de les bales i protegir-les convenientment per a que no hi entrin en contacte. Així i tot, s'ha de considerar la possibilitat de que es produeixi algun punt de discontinuïtat o algun fet que provoqui l'entrada en contacte de la palla amb l'aigua. Per aquest motiu és necessari que el mur pugui extreure la humitat d'alguna forma.

Pel que fa als fonaments, s'ha de prevenir la humitat per ascensió capil·lar (sigui provinent del terreny o de pluja) i els rebots de l'aigua de pluja. El més habitual és elevar la primera filada de bales respecte al nivell del terreny ja sigui a través de "sobrefonaments" o fonaments de base elevada (Vegeu Annex 3) o col·locant una capa d'impermeabilització que alhora permeti el drenatge de la humitat entre els fonaments i la placa de recepció (que s'utilitza per a fixar la primera filada de bales).

Els revestiments donaran a les bales la protecció definitiva enfront a la humitat per la qual cosa s'haurà de segellar qualsevol junta o imperfecció, principalment a la zona de les obertures. La coberta és important que disposi de voladissos generosos per evitar la deposició d'aigua a la façana.

Per millorar la protecció de les bales en alguns sistemes es recobreixen o s'arrebossen de calç o d'argila prèviament a la seva col·locació. D'aquesta manera en cas de que els mecanismes de protecció fallin es disposa d'una segona barrera.

- **Reforços dels murs**

Reforçar els murs és molt important a fi d'evitar concentracions d'esforços importants que puguin provocar el col·lapse de l'estructura. En el cas dels murs de càrrega tenen especial rellevància l'anell de coronació perimetral (que reparteix les càrregues i dona cohesió a l'estructura), els bastiments de les obertures i els sistemes de precompressió i d'ancoratge (acceleren l'assentament de les bales i milloren la seva cohesió). En els tancaments la col·locació d'elements de reforç tindrà un paper més secundari i s'encaminarà a millorar la resistència als esforços horitzontals i l'estabilitat dels murs.

El fet de que les bales siguin compressibles pot provocar assentaments importants en el seu ús en murs de càrrega. Per aquest motiu és habitual la precompressió dels murs abans d'aplicar el revestiment. Les càrregues aplicades s'hauran d'estudiar prèviament a fi de que siguin les adequades. El sistema de precompressió juntament amb el d'ancoratge als fonaments de l'anell perimetral superior garantiran l'estabilitat, la rigidesa i la correcta i uniforme transmissió de les càrregues.

- **Aplicació del revestiment**

Una execució acurada dels revestiments és imprescindible per garantir un bon comportament d'aquests i l'establiment de l'adherència adequada amb les bales de palla. L'elecció dels materials i del seus gruixos, el mètode d'aplicació i l'adequació de la superfície del mur influiran en el revestiment resultant (Vegeu Annex 4)

En general, els morters a base d'argila són els més recomanables ja que es complementen molt bé amb la palla, requereixen poca energia en la seva elaboració (es pot emprar la terra de la pròpia excavació), són fàcils d'aplicar i permeten obtenir una gran varietat d'acabats. Per contra, els morters de ciment (i calç) són més utilitzats ja que s'endureixen més ràpidament i són més coneguts pels constructors tradicionals. No obstant, la seva permeabilitat al vapor és molt reduïda i el seu consum energètic és molt superior als demés. Els morters de calç són força habituals com a complement del revestiment principal ja que en millora la transpiració al vapor, la durabilitat i permet obtenir superfícies d'acabat adequades.

Per a millorar la adherència entre superfícies i la ductilitat i la resistència del revestiment s'utilitzen bàsicament malles de reforç. Depenent del materials de revestiment i de la finalitat de la malla s'elegirà un tipus a un altre. (Vegeu Annex 4).

És recomanable realitzar els revestiments amb diverses capes de materials o de composició mixta de manera que cadascuna aportí alguna propietat a les altres i s'obtingui un revestiment el més complet possible.

- **Continuïtat en les propietats de la “pell” de l'edifici**

Tant pel que fa l'aïllament tèrmic com acústic, com a la ventilació i a la protecció enfront al foc o a la humitat, és important que en tota l'envolupant de l'edifici no es produeixin punts de discontinuïtat que puguin minvar les propietats d'aquesta.

Quant a l'aïllament tèrmic, s'han d'evitar els ponts tèrmics tant en els murs com en el forjats i coberta. S'ha de tenir en compte l'aïllament dels fonaments i sobrefonaments així com dels elements en contacte amb el terreny. L'aïllament que s'aconsegueix per una banda no s'ha de perdre per l'altra. En l'aïllament de forjats i fonaments és habitual l'ús cel·lulosa insuflada i les xapes de suro encara que també es pot emprar la mateixa palla.

Referent a les estanques al vent o la protecció front a la humitat o el foc, les juntes dels revestiments amb bastiments o amb elements de l'estructura (placa de coronació, pilars, placa de recepció, etc) resulten punts potencialment perillosos. Les juntes s'acostumen a reblir amb un mescla de palla i fang.

5. Murs de càrrega o tancaments amb bales de palla?

Cada sistema presenta certs avantatges però també algunes limitacions que es tindran en compte alhora d'elegir una solució constructiva. En general, no existeix un sistema millor que un altre sinó que cadascun s'adequa millor a determinades condicions i exigències i resulta més apte per a unes aplicacions o unes altres.

En les **construccions amb murs de càrrega**, la exigència en les bales és màxima ja que han de desenvolupar funcions estructurals i les pròpies del tancament (aïllament tèrmic, acústic, protecció front a la humitat, etc). Es tracta sistema molt econòmic (s'evita l'execució d'estructura) i que suporta molt bé les accions horitzontals (moviments sísmics) i l'acció del foc. D'altra banda presenta importants seves limitacions en el disseny. La compressibilitat de les bales és elevada i limita la llibertat en la realització d'obertures (tant en dimensions com en posició). La distribució de la coberta tendeix a ser senzilla. No és recomanable realitzar panys de paret de excessiva longitud i, com a màxim construccions de dues altures ja que l'estabilitat dels murs i l'adherència entre palla i revestiment es redueixen a partir de la segona planta i debiliten l'estructura.

En general aquest sistema estructural, per la seves característiques i nivell de desenvolupament, s'encamina més a construccions senzilles i de poc volum, preferentment de planta baixa: habitatges unifamiliars aïllats, construccions agrícoles no industrials i edificis públics de poca complexitat.

Degut a les limitacions de disseny i a la desconfiança en el comportament estructural dels murs realitzats amb bales de palla, actualment predomina l'opció d'utilitzar les bales com a tancament d'una estructura portant de fusta. Les estructures portants s'acostumen a realitzar-se a base de fusta, siguin estructures porticades o estructures d'entramat lleuger.

Aquests sistemes constructius ofereixen major flexibilitat en el disseny ja que les bales no entren en càrrega i no es comprimeixen. Per aquest mateix motiu, la realització de reparacions o modificacions en els murs és molt més senzilla i segura. El fet d'executar la coberta abans de realitzar el tancament evita interrupcions en el procés d'execució del mur i protegeix les bales de l'aigua de pluja. Per contra, aquesta solució suposa un consum energètic i de materials superior així com, habitualment, un major cost econòmic.

Els tancaments de bales de palla tenen un àmbit d'aplicació més ampli. A més de les aplicacions esmentades en els murs de càrrega, el seu ús s'estén a construccions més voluminoses com teatres o auditoris, sales de conferències, magatzems i naus industrials. En aquests casos les limitacions en l'ús del tancaments depèn bàsicament de la resistència als esforços horitzontals (vent). L'ús de bales de palla en tancaments és vàlid també en reformes i millores de l'aïllament a través de la tècnica del *retrofit*. (Vegeu Annex 3).

En els darrers anys han sorgit una tercera via pel que fa a construcció amb bales de palla: la prefabricació de murs i la construcció modular i racional (Vegeu Annex 3). Aquests sistemes optimitzen al màxim el temps de treball i eviten qualsevol tipus d'improvisació. El treball a taller facilita les tasques de muntatge del mur i el treball en cadena permet una elevada especialització en les diferents tasques d'execució. En el cas dels murs prefabricats es redueix al màxim l'exposició al clima exterior humit així com a la pluja i les possibles intrusions d'animals durant l'execució del mur.

Aquesta alternativa de treball sembla tenir major acceptació ja que normalment el realitzen persones especialitzades o amb certa experiència. El cost de ma d'obra especialitzada possiblement apuja el cost de l'element però, d'altra banda, s'assegura un producte de qualitat, un temps d'execució reduït i un cost definit.

6. Comportament dels murs realitzats amb bales de palla

Els murs realitzats amb bales de palla, de la mateixa manera que la resta de murs convencionals o realitzats amb materials habituals, han de complir una sèrie de requeriments d'acord a la seva funció en la construcció. A partir dels assajos realitzats al llarg del desenvolupament de l'ús d'aquest material s'ha demostrat que, a grans trets, es tracta d'un element constructiu que ofereix bones prestacions en tots els aspectes però pel que fa les funcions estructurals, el disseny del mur es troba força limitat. En la resta d'aspectes, si el mur s'executa correctament, els resultats acostumen a ser satisfactoris.

6.1. Resistència a compressió

Un mur realitzat amb bales de palla i revestit a banda i banda funciona de forma similar al d'un plafó sandvitx, és a dir, un nucli més o menys tou i aïllant (les bales) que serveix d'element de suport i transmet les càrregues a dues capes rígides (els revestiments) que s'encarreguen de suportar la majoria de les càrregues que actuen sobre el mur. Per a garantir una correcta transmissió de les càrregues és essencial que s'estableixi una bona adherència entre les bales i els revestiments.

Aquest mecanisme resistent s'observa en els nombrosos assajos realitzats. El més complicat però és estimar una resistència per a un mur de bales de palla ja que no existeixen uns criteris a seguir en la realització d'assajos ni en el procediment ni en la mostra a assajar. A més, la diversitat de materials de revestiment i de tipus de palla encara dificulta més aquest objectiu.

Tant dels assajos realitzats en les bales revestides com en panys de murs revestits es conclou que la orientació de la bala té una influència important en la resistència del conjunt. La manca d'adherència en les bales carregades de cantell redueix la resistència del mur ja que el revestiment es desferra de la bala i vincla, produint l'aparició de fissures i sobreesforços importants. Un altre factor a tenir en compte és la densitat de la bala que afecta a les deformacions del mur.

Per altra banda, la resistència del revestiment és determinant en la resistència global del mur. Segons els assajos realitzats (vegeu Annex 6) resulta més eficaç incrementar la resistència a compressió del revestiment que augmentar el seu gruix o millorar la resistència de les bales.

6.2. Resistència a l'acció del vent

Aquests tipus de construccions no presenta, en general, problemes front a les accions horitzontals del vent. Aquestes càrregues s'han de tenir en especial consideració en tancaments de gran superfície.

La capacitat de deformació i de compressió de les bales provoca que apareguin fissures horitzontals en els revestiments. Una vegada apareixen les primeres fissures, aquests passen a treballar com a bigues amples i de poc cantell en les que predominen els esforços tallants als de flexió. En aquest estat, són importants les malles de reforç que s'activen i treballen per reduir la fissuració dels revestiments.

Com a conclusió general, la resistència al vent dels murs dependrà bàsicament de la bona adherència entre mur i revestiment i del reforçament d'aquest per evitar un excés de fissuració que pugui debilitar el revestiment. Els murs de tancament molt esvelts poden resultar perillosos si no es reforcen convenientment.

6.3. Comportament front al sisme

Les estructures de càrrega realitzades amb bales de palla destaquen per la seva bona ductilitat i la capacitat per absorbir l'energia generada pel moviment sísmic. Les bales, gràcies a la seva capacitat de deformació, absorbeixen els moviments horitzontals i els revestiments resisteix els esforços sense col·lapsar de forma abrupta. En aquests casos tenen especial importància les malles de reforç del revestiment que milloraran la resistència d'aquest i el mantindran adherit a les bales. També s'haurà de tenir cura dels ancoratges als fonaments, especialment a les cantonades.

La bona resistència al sisme juntament amb la rapidesa de muntatge converteixen els murs de càrrega realitzats amb bales de palla en una solució molt interessant per a la construcció d'habitatges de primera necessitat per a les zones afectades per moviments sísmics.

6.4. Resistència al foc

El comportament en cas d'incendi de les construccions realitzades amb bales de palla es pot considerar força satisfactori d'acord als nombrosos assajos realitzats. La manca d'oxigen en l'interior de les bales i la protecció dels revestiments juguen un paper fonamental a fi d'obtenir resultats excel·lents en cas d'incendi. El gruix del revestiment i la seva resistència al foc permeten retardar la combustió de les bales fins el moment en que apareixen esquerdes i el foc hi pot penetrar. Les bales per sí soles també tenen certa resistència: la carbonització de la capa superficial evita l'entrada d'oxigen i es converteix en una segona barrera pel foc. A més, la manca d'oxigen a l'interior de la bala alentirà la combustió.

Els assajos exposats, tant de murs revestits i no revestits, demostren que les construccions de palla superen sense dificultats totes les normatives de resistència al foc en edificació assolint resistències de fins a 2 hores. A més, la seva bona capacitat d'aïllament tèrmic, redueix la transmissió de calor a la cara del mur no exposada al foc, cosa que permet mantenir el revestiment en perfecte estat.

Si consultem el Document Bàsic de Seguretat en cas d'incendi del Codi Tècnic de l'Edificació, veiem que la resistència al foc exigida per a elements estructurals d'un habitatge unifamiliar aïllat és de 30 minuts, valor que es compleix en tots els assajos exposats. De fet, si tenim en compte els assajos en que la resistència al foc superà els 90 i els 120 minuts, es podria considerar vàlid el seu ús en centres comercials, tancaments en zones urbanes, habitatges adossats, centres educatius, hospitals i en construccions d'altura important.

6.5. Comportament enfront a la humitat

Com ja s'ha esmentat, la humitat és el principal enemic de la palla. Si bé la palla no es veu afectada per humitats baixes, quan assoleix cert contingut humitat creix el perill de condensacions i de descomposició. Per prevenir aquests problemes, que afecten greument a les propietats de la palla, el mur ha de ser impermeable a l'entrada d'aigua (sigui de pluja, provinent del sol o

accidental) i alhora ha permès el pas del vapor d'aigua de manera que el mur s'assequi per difusió. (Vegeu Annex 6)

En aquest aspecte, els revestiments tenen un paper cabdal ja que exerceixen la funció de protecció i alhora regulen el grau d'humitat interna del mur. S'intentarà assolir un equilibri entre la humectació i l'assecament de les bales, reduint al màxim l'aportació d'humitat i afavorint el seu assecament per mitjà de l'aplicació de revestiments amb una bona permeabilitat al vapor.

El fet que la humitat d'equilibri de la palla sigui força elevada li permet emmagatzemar una quantitat d'humitat important sense perill per a la seva integritat. Per altra banda, la palla no presenta gaire resistència a la difusió del vapor ($\mu=2.5$) però el seu elevat gruix dona com a resultat una permeabilitat moderada. Per això necessita revestiments amb poca resistència a la difusió del vapor que facilitin l'assecament del mur.

La combinació de revestiments amb permeabilitat diverses (en funció dels materials utilitzats) permet assolir una àmplia varietat de comportaments adaptats a les condicions climàtiques i la humitat interior de cada lloc.

- **La descomposició de la palla**

La humitat és el factor desencadenant del procés de descomposició de la palla. En general, es recomana que les bales tingui un humitat inferior al 18% del seu pes sec.

No obstant, es requereixen altres elements per a que els microorganismes que duen a terme la descomposició pugui sobreviure i créixer: temperatura (entre 10 i 65°C), presència suficient d'oxigen i de nutrients (nitrogen, principalment).

L'execució d'un bon revestiment evitarà l'entrada d'aire dins la bala i, per tant el contingut d'oxigen arribarà a ser nul. Per altra banda, si la palla és ben assecada, la presència de nutrients serà insuficient per al desenvolupament de la vida de microorganismes i es consumirà ràpidament.

6.6. Comportament tèrmic

Els murs realitzats amb bales de palla combinen la baixa transmitància de les bales de palla i la gran inèrcia tèrmica dels revestiments per assolir una temperatura força estable a l'interior amb independència de les variacions climàtiques que es produeixen a l'exterior.

Segons els assajos realitzats en les darreres dècades s'estima que la transmitància de les bales de palla és de 0.045W/mK. En comparació amb altres materials habituals de tancament com els maons ceràmic o els blocs de formigó, l'aïllament és notablement superior i, fins i tot, la seva capacitat tèrmica és equiparable a d'altres materials específicament aïllants.

Material	Transmitància (W/mK)	Material	Transmitància (W/mK)
Bala de palla	0.045	Poliestirè extruït	0.039 - 0.033
Maó buit	0.32	Llana mineral	0.050-0.031
Bloc de formigó alleugerit	0.45	Xapes de suro	0.049
Poliestirè expandit	0.045 - 0.029		

Recull de transmitàncies tèrmic dels principals materials aïllants. Font: Producció pròpia.

És destacable la diferència de capacitat aïllant en funció de la posició de la bala. Segons els assajos realitzats, les bales disposades de cantell, a igualtat d'espessor, presenten una major resistència tèrmica (una tercera part, aproximadament) que les col·locades en pla. Això és deu a que, en aquestes últimes, les fibres de palla es troben perpendiculars al gruix del mur i permeten el contacte directe amb l'entorn i l'intercanvi de calor. Per aquest motiu, en l'execució de tancaments, que no suporten càrregues gravitatòries i, per tant, l'adherència amb les bales no és tan important, és una bona opció disposar les bales de cantell i augmentar d'aquesta manera la superfície útil de la construcció.

A pesar de la bona capacitat aïllant de la palla, l'assoliment d'un nivell de confort intern adequat no és possible sense elements de gran inèrcia tèrmica que retinguin la calor i regulin les oscil·lacions tèrmiques de l'exterior. Per a aquest funció tindran especial importància els revestiments i altres elements d'elevada inèrcia tèrmica que els completin (vegeu Annex 5). D'aquesta forma es reduirà al màxim l'ús de sistemes de climatització.

6.7. Comportament acústic

Els murs realitzats amb bales de palla tenen un comportament acústic semblant als de plafons sandvitx, és a dir, dues membranes no massa rígides però suficientment denses (els revestiments) que combinades amb el nucli relativament dens i porós (bales) que amorteixen els sons.

D'acord amb els assajos realitzats es pot establir un rang d'aïllament de entre 43 i 55dB per a freqüències baixes. D'acord amb aquests valors, els murs realitzats amb bales de palla compleixen els requeriments establerts pel CTE per als tancaments per a usos residencials però també per altres usos com escoles, edificis culturals i administratius.

Per a millorar l'aïllament acústic és recomanable utilitzar bales menys denses, anar en compte amb les juntes de les finestres i portes, col·locar els revestiments (preferentment argilosos) amb gruixos diferents (més gruixuts a la banda de la font de soroll) i evitar connexions metàl·liques que travessin el mur. En general, s'ha de vigilar que a les zones de discontinuïtat es perdi l'aïllament que s'assoleix als murs.

6.8. Comportament enfront a l'atac d'insectes i d'altres organismes

En relació a aquest aspecte no hi ha assajos ni estudis que assegurin un comportament en concret. Les experiències i els successos que s'han pogut observar en el creixent nombre de construccions realitzades amb bales de palla permeten tenir una idea més o menys clara del que s'ha de fer o no s'ha de fer per a prevenir o resoldre els atacs d'organismes.

Habitualment els problemes d'insectes a les bales de palla tenen relació directa amb un elevat grau de humitat, especialment en aquells terrenys molt humits i en les construccions en que no s'ha separat correctament el revestiment del terreny. Serà important evitar l'ús de bales amb un elevat contingut de gra ja que atraurà la presència d'insectes i ratolins. En la majoria de casos, els problemes d'insectes desapareixen després d'un procés d'incubació i de l'assecat del mur. Per evitar o eliminar la presència d'insectes s'ha d'assecar el mur i mantenir-lo sec a través de la ventilació. L'aplicació de mètodes químics s'ha dut a terme en diversos casos i ràpidament s'ha demostrat que no és efectiva.

Pel que fa a la formiga blanca, un organisme molt perillós per a les construccions de fusta, no s'han trobat casos de construccions amb bales de palla en que aquestes afectin a la integritat de la palla. Steen explica en un dels seu llibres que en una antiga construcció amb realitzada amb bales de palla, la formigues blanques varen devorar les portes i les finestres, però deixaren els murs de bales de palla intactes. Per tant, no sembla que la palla sigui l'aliment predilecte d'aquests organismes que prefereixen atacar la fusta.

7. Impacte mediambiental de les “cases de palla”

La construcció és una de les principals activitats de degradació del medi ambient i de la extracció de recursos naturals. Aquest sector produeix el 45% de les emissions de CO₂ mundials a causa de la extracció i la transformació de materials. D'altra banda a Espanya, el 40% del consum energètic es deu a la construcció i manteniment d'habitatges. Aquestes només són algunes de les dades que reforcen la necessitat d'utilitzar nous materials i tècniques que permetin construir de forma més sostenible, és a dir, seguint els principis de la bioconstrucció.

L'impacte medi ambiental d'una construcció depèn en gran mesura dels materials utilitzats. Els indicadors de l'impacte mediambiental dels materials de construcció són bàsicament:

- L'energia incorporada o energia de producció
- L'emissió de CO₂
- El consum de matèries primeres
- El reciclatge potencial dels materials
- El seu efecte en els ocupants o treballadors (toxicitat)
- La seva influència en el consum d'energia

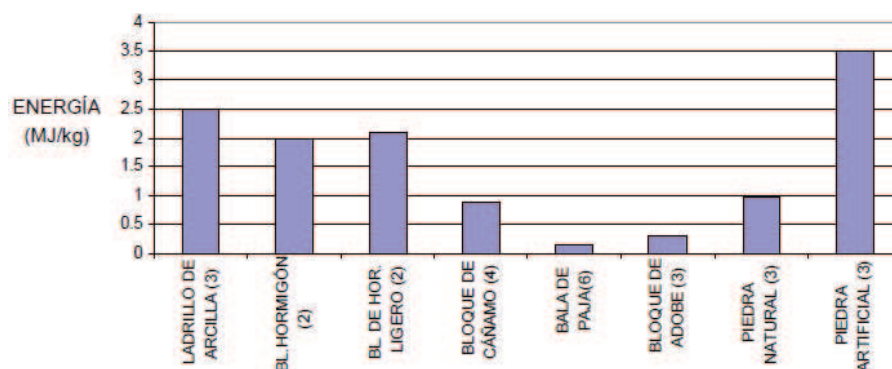
L'ús de bales de palla i d'altres materials naturals en la construcció permeten assolir grans resultats en tots aquests indicadors i obtenir d'aquesta manera construccions totalment sostenibles.

7.1. Energia incorporada a l'edifici

S'entén com a energia incorporada d'una construcció a l'energia consumida per tots els processos associats a la seva producció, des de l'adquisició de l'obtenció dels materials fins a la finalització del l'edifici. Alguns càlculs van més enllà i inclouen l'energia per a reparacions i manteniment necessaris durant la vida útil del material i l'energia per a una demolició definitiva. Els materials processats a temperatures elevades com els metalls i els plàstic suposen una incorporació d'energia elevada.

Les plantes tenen la capacitat de capturar la radiació solar i utilitzar aquesta en el seu creixement. Això suposa que per a la producció de fibres naturals es requereix només entre un 10 i un 15% de l'energia utilitzada en la producció d'altres fibres minerals o sintètiques.

En aquest sentit, el potencial de les construccions amb bales de palla per a reduir el consum energètic és molt gran. S'ha realitzat diversos estudis per a determinar l'energia incorporada de les bales de palla. El càlcul és realment molt complicat i es basa en la estimació ja que el seu resultat depèn de molts factors (maquinària d'emalatge, transport del producte, cost del combustible, etc). El llibre *The Straw Bale Book* estableix el contingut d'energia en 0.13MJ/kg, l'especialista Gernot Minke el fixa en 14MJ/m³ (considerant una densitat de 100kg/m³, 0.14MJ/kg). *The Ecological Design Association* estima una energia incorporada de 0.25 MJ/Kg. Per altra banda, Sherwood Botsford de la University of Alberta considera la energia consumida podria arribar a ser fins i tot negativa. Dins la gran varietat de valors, tots realment baixos, sembla que l'estudi amb millor consideració i més esmentat és el realitzat per Ann Edminster (1995) segons el qual l'energia incorporada és de 0.24MJ/kg. Si es compara amb materials més habituals com els maons o els blocs de formigó es pot veure com aquests són de 8 a 10 vegades majors.

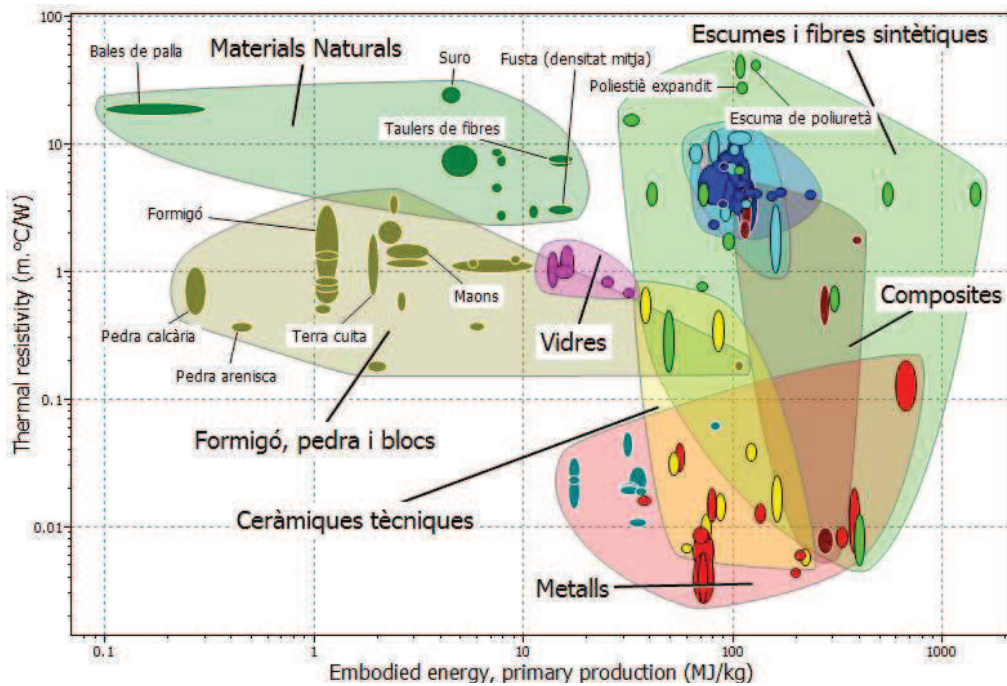


Gràfic comparatiu d'energia incorporada en diferents materials de tancament.
Font: Presentació Jornades sobre la construcció amb bales de palla. C. Claret i D. Calatayud.

Una mesura clau per a reduir l'energia incorporada és la disminució al màxim del transport de materials. En aquest sentit, en la construcció de bales de palla s'ha de d'intentar adquirir la matèria primera a productors locals o aprofitar, si és possible, els recursos naturals de que es disposa.

L'exemple més clar és l'aprofitament de la terra d'excavació per a elaborar els morters d'argila utilitzats en el revestiment de les bales reduït l'energia de transport i de producció total.

El següent gràfic realitzat amb el programa CES Edu Pack 2011 estableix una relació entre l'energia incorporada en la producció primària (en l'eix X) i la resistència tèrmica (en l'eix Y). Es pot veure com les bales de palla es troben en la zona superior esquerra, per tant, són un bon material aïllant i alhora requereixen molt poca energia en la seva producció. També s'observa com els naturals són el grup de materials que té millor relació resistència tèrmica- energia incorporada i que les escumes, a pesar de ser molt aïllants, requereixen molta energia en la seva producció.



Gràfica que relaciona la resistència tèrmica i l'energia incorporada en la producció.
Font: Producció pròpia. Programa CES Edu Pack

7.2. Consum de CO₂

El consum d'energia suposa una important emissió de CO₂ a l'atmosfera. Com es pot veure al gràfic següent, en un habitatge tipus a Catalunya gairebé la meitat de les emissions de CO₂ produïdes al llarg de la seva vida útil es deuen a la seva construcció. L'emissió de CO₂ generada per calefacció de l'habitatge i la producció d'aigua calenta és l'altra punt important a considerar.



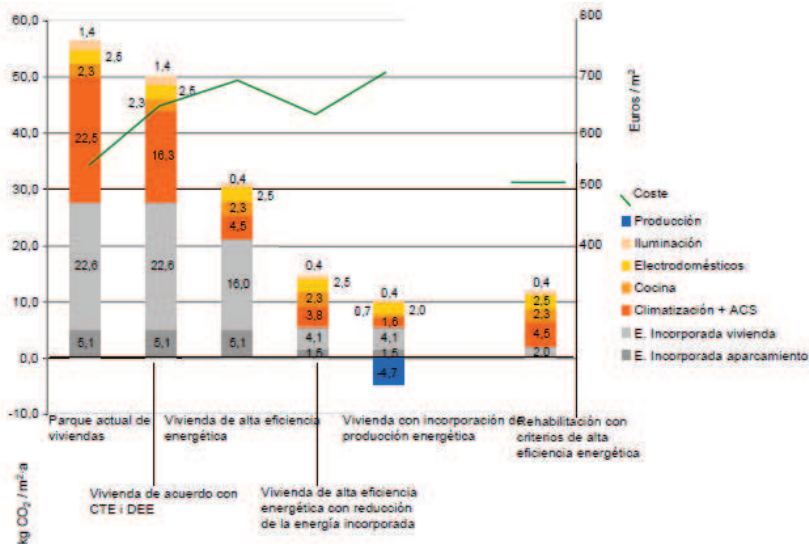
Percentatge d'emissions d'un habitatge tipus a Catalunya per una vida útil de 50 anys.

Font: Presentació Jornades sobre la construcció amb bales de palla. C. Claret i D. Calatayud

50% d'emissions = "energia incorporada"

En aquest sentit, les construccions amb bales de palla incideixen directament en aquests dos aspectes. D'una banda utilitzen materials naturals els quals requereixen una baixa emissió de CO₂

en la seva producció. De fet, l'absorció química de CO₂ que suposa la fotosíntesi dels cereals en el seu creixement acostuma a ser superior a l'emissió de CO₂ durant la producció i el transport de les bales, per tant la seva petjada ecològica és nul·la. D'altra banda, es tracta d'edificis molt eficients energèticament que redueixen la necessitat de calefacció de l'habitatge. Tot això combinat amb la utilització d'energies renovables permet reduir en gran mesura el consum energètic de l'habitatge i, en conseqüència, l'emissió de CO₂.



Reducció potencial d'emissions de CO₂ i cost per m².

Font: Presentació *Jornades sobre la construcció amb bales de palla*. C. Claret i D. Calatayud

7.3. Reciclatge potencial

Les construccions amb bales de palla permeten el reciclatge de bona part dels materials que les conformen. La palla es pot aprofitar en l'elaboració d'altres bales (depenen del seu estat), de materials compostos (mesclada amb fang) o per a la producció de biocombustibles. En qualsevol cas, es tracta d'una material biodegradable i no genera cap tipus de residu perjudicial per al medi ambient i el consum energètic que requereix el seu aprofitament és molt reduït. En canvi, materials habituals com el formigó o l'acer generaran grans volums de residus que suposaran un inconvenient i un increment del consum energètic.

De la mateix manera els revestiment argilosos o a base de calç també es poden aprofitar com a material de reblert i la fusta per a finalitats diverses. Si s'utilitzen materials naturals, els residus que s'obtenen són molt reduïts amb la qual cosa l'energia consumida en la demolició i el transport de residus és mínima.

8. La vida útil de les construccions i el seu manteniment

Les construccions més antigues realitzades amb bales de palla superen els 110 anys i, amb un manteniment adequat, es poden conservar durant molts anys més. La palla es pot mantenir intacte durant dècades i, fins i tot, centenars d'anys si s'assoleixen les condicions apropiades,

principalment s'han d'evitar continguts d'humitat elevats i s'ha de mantenir la continuïtat en les propietats dels revestiments.

Si es du a terme una bona planificació de les operacions de manteniment la vida útil d'aquestes construccions es podrà prolongar com en qualsevol construcció convencional. En aquest sentit l'element més important per garantir el bon estat de les bales de palla és el revestiment. S'haurà de prevenir una degradació excessiva, principalment en aquells que s'exposin a climes durs de pluja i vent. Per això serà important elegir l'acabat adequat i donar una capa de protecció regularment per mantenir el gruix i les propietats del parament.

És important garantir la estanquitat del mur tant de l'aigua de pluja com de les possibles fuites en les instal·lacions. S'haurà d'inspeccionar periòdicament l'estat de les juntes en les finestres, la impermeabilització de la coberta i els punts de pas d'instal·lacions d'aigua a través dels murs.

Per altra banda, és recomanable comprovar l'absència de fissures en els revestiments cada 6 mesos o un any ja que pot suposar una entrada d'humitat en el mur. Si se n'observa alguna es segellarà convenientment. Els revestiments a base de calç resulten molt útils en aquests casos ja que segellen les fissures amb molta facilitat.

També s'anirà en compte amb les càrregues que es s'apliquin en el mur al llarg de la seva vida útil ja que en el cas d'aplicar-se càrregues importants, per exemple estants o armaris penjats, que no s'hagin previst en el projecte poden aparèixer fissures en el revestiment o deformacions dels murs.

En aquelles construccions que disposin d'estructura de fusta s'haurà d'anar amb compte amb el possible atac de formiga blanca, principalment en les zones més pròximes al terra. En el cas de que hi hagi forjat sanitari, es controlarà la presència de rosegadors i segellarà qualsevol possible entrada a través dels passos d'instal·lacions.

9. Les construccions amb bales de palla i la normativa

La normalització i l'estandardització de les construccions realitzades amb bales de palla és un dels principals cavalls de batalla de les associacions i els investigadors. Actualment la seva situació legal és molt diversa (Vegeu Annex 7) i, en general, la seva normalització es troba endarrerida. Només hi ha tres països que disposen d'una normativa específica per la construcció realitzada amb bales de palla i el seu ús en alguns d'ells es troba limitat a certes aplicacions.

En la normativa espanyola no es contempla la utilització d'aquest material en concret però el Codi Tècnic de l'Edificació dona la possibilitat de construir amb materials innovadors sota la responsabilitat del projectista i amb l'aprovació del promotor, sempre que es demostrï que es compleixen els requeriments fixats per als materials "convencionals". La justificació del compliment de les exigències del CTE es basa normalment en assajos realitzats en altres països més avançats (com Alemanya) o d'altres habitatges de característiques similars que ja s'han realitzat al país. Aprofitant aquesta puntualització normativa s'han construït diversos habitatges de forma legal encara que el nombre és encara molt reduït (al voltant d'un centenar de construccions).

10. Estudi d'un cas real

Amb l'objectiu d'aprofundir més en el coneixement de l'ús de les bales de palla en la construcció, s'ha estudiat un habitatge unifamiliar realitzat a Mallorca seguint els principis bàsics de la bioconstrucció en el que els tancaments es realitzaren amb bales de palla. Es tracta de la primera edificació realitzada amb bales de palla de les Illes Balears.

Abans d'iniciar el treball, l'objectiu era el d'analitzar amb deteniment els diferents aspectes que afecten a la construcció d'aquest habitatge realitzat amb bales de palla (disseny, execució, pressupost, principals prestacions, etc) i comparar-lo amb els d'una construcció més "convencional". No obstant, així com vaig anar avançant en la primera part del treball em vaig adonar de que l'objectiu que m'havia marcat era possiblement massa ambiciós i que suposaria una càrrega de treball excessiva. Per aquest motiu i mantenint la voluntat de traslladar el coneixement après a un cas pràctic, he decidit descriure i analitzar amb alguns càlculs senzills els paràmetres més importants d'aquest projecte.

La construcció objecte d'estudi és un habitatge unifamiliar aïllat edificat al terme municipal de Selva (Mallorca). L'habitatge disposa de planta baixa i un altell a més de terrassa i piscina. L'estructura portant es realitzà a base de fusta (bàsicament kvh) i els tancaments foren realitzats amb bales de palla de 45cm d'amplada i revestiments formats per diverses capes a base d'argila i calç.

En l'annex 8, hi apareix una descripció detallada de l'habitatge i del seu procés d'execució. A través del seguiment de l'obra es pot veure com el que s'explica en els diferents annexes d'aquest treball queda més o menys plasmat a una obra real.

10.1. Consideracions del disseny i l'execució

L'execució d'aquest habitatge va estar marcada per continus canvis i interrupcions en les diferents fases d'obra. De fet, després d'analitzar el conjunt de procés constructiu s'observen decisions poc coherents amb la línia sostenible que pretén seguir el projecte.

Els fonaments de l'estructura de fusta realitzats a base de formigó de calç amb l'objectiu de reduir l'energia incorporada i de prevenir l'efecte Faraday es contraposen amb els dipòsits d'aigua i el vas de la piscina executats amb grans quantitats de formigó armat. No hi ha, per tant, una coherència en l'elecció de materials.

En l'elaboració del morter de revestiment es va decidir comprar l'argila en pols. No es realitzaren provatures amb la terra del solar cosa que no hauria suposat una gran inversió i que, en cas de d'aconseguir la terra adequada hauria reduït el cost econòmic i energètic del revestiment.

En l'estratègia de climatització passiva, s'aprofiten les condicions climàtiques del lloc i les característiques de l'edifici per assolir un disseny que permeti reduir al màxim la climatització externa. Els disseny és basa en una bona orientació de l'edifici que aprofita al màxim la radiació solar en el seu recorregut al llarg del dia de manera que durant l'hivern el guany solar redueixi

l'aportació externa d'energia. Això s'aconsegueix adaptant la forma de l'edifici de manera que es maximitzi la captació solar de la façana orientada a sud. En aquest sentit la distribució de l'habitatge permet que totes les estances gaudeixin d'una bona orientació, vistes agradables i accés directe a la terrassa.



Font: Presentació "Diseño y construcción de una casa de paja en Mallorca". R. Sala

Per a contrarestar les temperatures elevades dels mesos d'estiu es dissenya un voladís de dimensions generoses, es col·loquen persianes mallorquines i un porxo on hi creix vegetació que eviten l'entrada directa del sol i redueixen el guany solar. A més, la disposició de les finestres enfrontades donant a espais d'orientació, condicions climàtiques i altura diferents generen un moviment d'aire a l'interior que refresca l'habitatge i n'extreu l'aire escalfat.



Font: Presentació "Diseño y construcción de una casa de paja en Mallorca". R. Sala

Aquesta estratègia bioclimàtica es complementa perfectament amb l'elevat grau d'aïllament dels tancaments realitzats amb bales de palla. De fet, es considerarà prioritari obtenir un bon aïllament tèrmic de l'envolupant però sense oblidar la importància que de la inèrcia tèrmica per a contrarestar els canvis de temperatura externes. En aquest sentit, el revestiments gruixuts i el paviment ceràmic escollit contribueixen a incrementar la inèrcia tèrmica de l'edifici.

Per contra, l'elecció del sol radiant com a sistema de calefacció no resulta adequada donat el clima de la zona i l'elevada capacitat d'aïllament tèrmic del tancament. Es disposaren col·lectors solars de 10m² de superfície total i un depòsit que proporcionen la totalitat de l'aigua calenta sanitària i a més subministren l'aigua calenta que circula pels sol radiant de capil·lars fins que funciona a baixa temperatura. Es tracta d'una sistema de calefacció que s'acostuma a mantenir encès de forma ininterrompuda durant períodes llargs de temps, en canvi, el clima mediterrani es caracteritza per canvis constants en la climatologia. Les temperatures suaus a l'hivern poden ser fredes però només en períodes puntuals.

En resum, és tracta d'una construcció de contrastos: d'una banda utilitza materials sostenibles com el formigó de calç, les estructures de canyes en els murs de bales o la fusta kvh però de l'altra, en alguns aspectes es romp amb la filosofia d'aquest tipus de construcció: projecció d'un piscina, depòsits de formigó armat, calefacció excessiva, canvis continus no prevists, etc.

10.2. Estudi econòmic

Aquest aspecte és bàsic per a que qualsevol producte tingui sortida en el mercat, especialment en la situació econòmica actual. En el cas que ens ocupa s'han combinat diferents sistemes de treball. D'una banda l'estructura fou elaborada a taller i muntada a obra per personal especialitzat. L'aixecament dels murs de bales de palla fou realitzat a través d'un grup de voluntaris (autoconstrucció) i els revestiments per mitjà de personal contractat. Hi ha per tant diversitat formes de treballar i d'habilitat que influeixen notablement en els rendiments i els temps d'execució i també en el cost final.

- Costos per capítols

A continuació es presenta el resum per capítols del pressupost inicial de la construcció. S'ha de tenir en compte que bona part de les partides dels capítols de "Fàbriques i envans" i de "Arrebossats i enlluïts" no són correctes. Aquest fet es deu als nombrosos canvis que es realitzaren durant el transcurs de l'obra i que afectaren principalment als revestiments (tant interiors com exteriors). La dificultat per a determinar a priori el cost referent als murs de bales de palla és també un inconvenient.

CAPÍTOL	COST TOTAL	% DEL TOTAL
MOVIMENT DE TERRES	3.746 €	2.05
FONAMENTS I FORMIGONS	26.393 €	14.45
ESTRUCTURA DE FUSTA	58.284 €	31.98
SANEJAMENT I VENTILACIÓ	7.740 €	4.24
COBERTA	9.920 €	5.44
FÀBRICUES I ENVANS	5.595 €	3.07
ARREBOSSATS I ENLLUITS	8.570 €	4.70
PAVIMENTS I ENRAJOLATS	3.618 €	1.99
PEDRA I PEDRA ARTIFICIAL	813 €	0.45
ÀILLAMENT I IMPERMEABILITZACIÓ	4.405 €	2.42
AJUDES DE PALETA	3.252 €	1.78
FUSTERIA	20.845 €	11.44
SERRALLERIA	1.606 €	0.88
ENVIDRAMENTS	596 €	0.33
PINTURA	2.580 €	1.42
INSTALACIÓ DE FONTANERIA	6.924 €	3.80
INSTALACIÓ ELÈCTRICA	5.518 €	3.03
CALEFACCIÓ	10.922 €	5.99
CONTROL DE QUALITAT	692€	0.38
TOTAL PRESSUPOST	182.239 €	

El que més atreu l'atenció a primer cop d'ull és l'elevat incidència del cost d'execució de l'estructura de fusta. Representa gairebé un terç del pressupost inicial. En aquest estil constructiu que acostuma a cercar la racionalització i, en general, la construcció a preus raonables, sembla un contrasentit aquesta important despesa tenint en compte les dimensions de l'habitatge. Considero que possiblement s'haguessin pogut trobar altres dissenys estructurals igualment vàlids i que suposessin una inversió inferior. El disseny de l'altell incrementa la complexitat de l'estructura i, per tant, el seu cost. Aquesta solució estructural, per altra banda, optimitza molt la fusta, és fàcil de muntar, i redueix al mínim la petjada ecològica (la fusta kvh presenta un certificat de producció sostenible). La opció de murs de càrrega realitzats amb bales de palla seria una altra possible solució per eliminar el cost de l'estructura però possiblement implicaria canvis en el disseny de l'habitatge. Els sistemes híbrids haguessin pogut ser una altra alternativa.

Quant al moviment de terres, el principal cost es troba en l'excavació de l'aljub i la piscina. L'excavació per als fonaments per mitjà de rases resultà més difícil però d'aquesta forma s'evità l'ús d'encofrat per formigonar els fonaments i es desplaça menys volum de terra. En general fou un moviment de terres bastant senzill cosa que es reflexa en el cost total del capítol el qual només suposa un 2% del pressupost total.

Dins el capítol de fonaments i formigons destaca l'ús de formigó de calç en la formació de les bigues de fonamentació de l'habitatge. El seu cost, que és sensiblement superior al del formigó armat habitual, es compensa amb un millor comportament front a la humitat i la reducció de l'energia incorporada. El que fa pujar de forma important el cost d'aquest capítol és l'execució del vas de la piscina i els depòsits els quals es realitzaren amb formigó armat i requerien l'aplicació de revestiments hidròfugs.

Són remarcables també els més de 20000€ del cost de fusteria. Això es deu a que es tracta de fusteria d'elevada resistència tèrmica. Es tracta, possiblement, d'una mesura minimitzar la pèrdua excessiva d'aïllament tèrmic en les obertures i mantenir així la continuïtat de propietats del tancament. Trobem, a més, un nombre important d'obertures de dimensions molt variades cosa que incrementa encara més el cost de fabricació.

Respecte a les instal·lacions, el cost de calefacció és el més elevat ja que inclou les plaques solars i la instal·lació del terra radiant que, com s'explicarà més endavant no s'adequa al tipus de construcció ni al clima del lloc .

- **Cost del tancament realitzat amb bales de palla**

El cost d'aquest tipus de construccions presenta moltes variables tant pel que fa als materials com el mètode d'execució. Ara bé, el que és clar és que el **cost de les bales** és notablement inferior al de la resta de materials utilitzats en l'aixecament de murs. El cost d'una bala de palla pot oscil·lar aproximadament entre els 0.5 i els 5€ en funció de la collita i les característiques de la bala (tipus de palla, densitat, dimensions, etc). Degut a les seves dimensions el nombre de bales a emprar per

unitat de volum és notablement inferior als dels altres elements de tancament. Aquest fet, combinat amb la lleugeresa de les bales, redueix la mà d'obra necessària i el temps d'execució.

El **rendiment de col·locació de les bales de palla** varia a per a cada sistema constructiu i de qui ho executa. Depèn també del bon disseny i racionalització de les bales a col·locar, és a dir, com menys operacions de modificació s'hagin de fer i més homogeneïtzades estiguin les bales més àgil serà la col·locació d'aquestes. A més, el rendiment serà diferent depenent de si es col·loquen bales en un part cega o es realitzen els encontres en les zones de portes i finestres. Determinar a priori el rendiment de col·locació en una obra realitzada per personal no especialitzat és molt complicat.

D'altra banda, el **sistema elegit** (murs de càrrega, tancaments o estructures mixtes) farà variar el cost de materials i de la mà d'obra. Les estructures amb murs de càrrega redueixen els costos de materials ja que no disposen d'estructura portant. Però, d'altra banda, s'incrementa la mà d'obra necessària per col·locar els elements de reforç, realitzar les operacions de precompressió i ancoratge i col·locar els bastiments i els anells perimetrals.

Finalment, el **cost del revestiment** també pot variar molt en funció del gruix, el material utilitzat i el sistema d'execució. L'ús de màquines de projecció redueix la mà d'obra necessària i optimitza el procés d'execució.

En el cas de l'habitatge estudiat, el cost del tancament no fou pressupostat correctament en el projecte, per la qual cosa es desconeix el seu cost real. A fi de poder analitzar-lo s'ha decidit estimar un cost aproximant tenint en compte els materials i la mà d'obra. No obstant, l'anàlisi d'aquest cost ha resultat molt dificultós per diversos motius:

- Durant el procés d'execució es realitzaren nombrosos canvis en el disseny original previst en el projecte, principalment per ordre dels promotors. Aquests canvis afectaren a la composició dels revestiments i encara que es coneixen els canvis realitzats, no es disposa de les dades per determinar cost real de l'obra.
- La manca de cooperació per part del promotor que és l'únic que disposa de tot la informació econòmica referent a l'execució dels murs de bales de palla.
- Les dades de mà d'obra de que es disposa no tenen en compte que un part de les hores comptabilitzades en realitat són hores de demostració i aprenentatge.

Abans d'iniciar amb el càlcul s'ha de deixar clar que l'estimació d'un cost per metre quadrat de bales de palla o de revestiment no reflecteix la diferència entre l'execució de les diferents parts del mur i obvia alguns aspectes. Crec que per determinar el cost del tancament, aquest s'hauria de descompondre en diverses partides. Per exemple, en la col·locació de les bales, no es té el mateix rendiment en un mur cec que en un mur amb obertures o que ha d'encaixar amb una estructura de fusta. És a dir, hi ha parts del murs que són més dificultoses que d'altres i, per tant, això es reflectirà en el temps invertit i en el cost final.

El principal inconvenient és que la diversitat de solucions constructives i d'acabat és molt gran i en cada cas el cost és diferent amb la qual cosa és molt complicat extreure un preu que es pugui considerar estàndard.

En el cas de l'habitatge estudiat, a primer cop d'ull, algunes de les partides que es podrien diferenciar són:

- ✓ M² Mur realitzat amb bales de palla (part cega). El seu cost és el més reduït ja que gairebé no requereix operacions de modificació de bales.
- ✓ ML. Acabat de finestres i portes. La forma arrodonida en que es dissenyaren el caires de les portes i les finestres requereix materials i diversos treballs específics. En primer lloc s'han de retallar les bales d'acord a aquesta forma. A continuació s'ha de reblir l'espai que resta buit amb mescla de palla i argila i finalment es cobreix amb una malla de tela de sac i canyís.
- ✓ ML. Última filada del mur de bales. Es retallen les bales d'acord a l'espai que queda entre el mur i el forjat de coberta o es rebleixen amb palla solta i argila.

A pesar del que s'ha explicat fins ara, la manca d'informació en relació al costs econòmics de la construcció fa impossible aprofundir en l'elaboració d'aquests preus descomposts. Amb la poca informació facilitada únicament s'ha pogut elaborar dos preus: un referent a la col·locació de les bales i la preparació del mur pel revestiment; i un altre en relació al cost d'execució de la capa base del revestiment.

- Cost del mur de bales de palla

Considerarem que s'empren aproximadament 3 bales per m² (dimensions de 100x40x45cm) i que es compra un 10% més de les bales necessàries per a imprevistos. El preu de les bales fou aproximadament d'1€ per unitat, les quals s'encarregaren a un agricultor pròxim a la obra.

El treball fou executat per voluntaris els quals aprengueren i foren dirigits per una persona especialitzada. Els voluntaris no disposaven d'experiència en aquesta tècnica, per això, el seu rendiment fou força baix. Es trigà un total de 15 dies laborals en l'aixecament del mur de bales de palla i el condicionament de la seva superfície. La jornada de treball era de 8 hores.

El desglossament aproximat de les hores de treball es pot veure a la taula següent.

Dia	Tasca	Nº de treballadors *	Hores per treballador	Total hores/dia
11/08/2008	Preparació i col·locació de bales	4.5	8	36
12		4.5	8	36
13		5	8	40
14		4	8	32
15		5	8	40
18	Col·locació de bales i operacions prèvies al revestiment	10	8	80
19		8.5	8	68
20		5.5	8	44
21		5.5	8	44
22		6.5	8	52

25	Col·locació de les darreres bales	7.5	8	60
26	Preparatius per al revestiment	6	8	48
27		7.5	8	60
28		4	8	32
29		6	8	48
TOTAL HORES VOLUNTARIS				720

S'ha de tenir en compte que a aquestes hores s'han d'afegir les 8 hores diàries de treball de direcció i supervisió de l'especialista en construccions realitzades amb bales de palla, Rikki Nitzkin. Per tant el total d'hores invertides serà de : $720+(8*15) = 840$ hores

Cal tenir en compte el rendiment dels voluntaris no és constant i va evolucionant amb el temps. És a dir, el voluntaris van adquirint habilitat amb el temps i la pràctica, per tant és molt complicat determinar el seu rendiment de treball. A més, del total d'hores invertides, hi ha una part important que és temps d'explicació de la persona experta i d'aprenentatge dels voluntaris. Per tant, les hores de treball reals menys de les hores invertides. Per tenir en compte aquest factor i obtenir un preu més ajustat a la realitat considerarem una reducció del 15% de les hores invertides. Per tant seran 612 hores de treball dels voluntaris i 102 hores de treball de l'experta (R.Nitzkin). Aquestes hores inclouen: modificació i col·locació de bales, regularització de la superfície, rebliment de forjat, col·locació de malles de canyís i aplicació de la capa d'argila de preparació de la superfície.

Encara que el treball dels voluntari no suposarà cap cost econòmic en aquest estimació es considerarà que la seva retribució fou la equivalent a la d'un "aprenent". D'altra banda, les hores de treball de la supervisora i directora se'ls assignarà un cost de "Oficial primera". D'aquesta manera es podrà comparar amb el cost d'un tancament convencional.

Si considerem la superfície total de tancament que s'aixecà és de $191,60 \text{ m}^2$. (Vegeu els plànols o el pressupost adjuntats) es pot calcular un rendiment estimat de mà d'obra tant pel grup de voluntaris com pel tècnic especialista. A partir d'aquests rendiments s'han determinat un cost per m^2 que permetrà la comparativa amb el cost d'un tancament convencional.

$$\text{Rendiment dels voluntaris} \rightarrow 612 \text{ h} / 191,60\text{m}^2 = 3.19\text{h/ m}^2$$

$$\text{Rendiment de l'experta} \rightarrow 102 \text{ h} / 191,60\text{m}^2 = 0.53\text{h/ m}^2$$

El rendiment dels voluntaris es especialment baix en aquest s'inclou tant l'execució de la part cega com les obertures del mur. Si fos possible extreure un rendiment per m^2 de mur cec el rendiment seria molt superior.

Els preus de mà d'obra s'assignaran d'acord a la Base de Preus de la Construcció del Col·legi Oficial d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Mallorca. Edició de 2010.

CONCEPTE	UNITATS	COST UNITARI	COST TOTAL
Bales de palla	3 unitats	1€/unitat	3,00€
Aprenent (voluntaris)	3.19 h/m ²	10.47€/h	33,40€
Oficial de 1 ^a (R.Nitzkin)	0.53 h/m ²	21.28€/h	11.28€
Mitjans auxiliars (6.5%)	0.065	47.68€	3.09€
COST TOTAL(m²)			50.77€

Per tant, si la mà d'obra fos contractada, el cost aproximat per metre quadrat de mur de bales de palla a punt per ser revestit seria d'uns 50.77€. És evident però que es tracta d'un preu per aquest cas en concret, no es pot extrapolar a la resta de murs realitzats amb bales de palla. A la realitat el treball dels voluntaris no és remunerat, amb la qual cosa el preu quedaria reduït a gairebé una tercera part (15€/m²).

A continuació establirem una comparativa que permeti, extreure un idea més o menys clara del que suposa el cost d'un mur realitzat amb bales de palla respecte a un tancament de diverses fulles convencional i molt utilitzat. Es tracta d'una tancament format per tres fulles: una fàbrica de maons de 14cm (H-16), una capa d'aïllament a base de plaques de poliestirè extruït de 5cm d'espessor i una fàbrica de maons de 8cm (H-6).

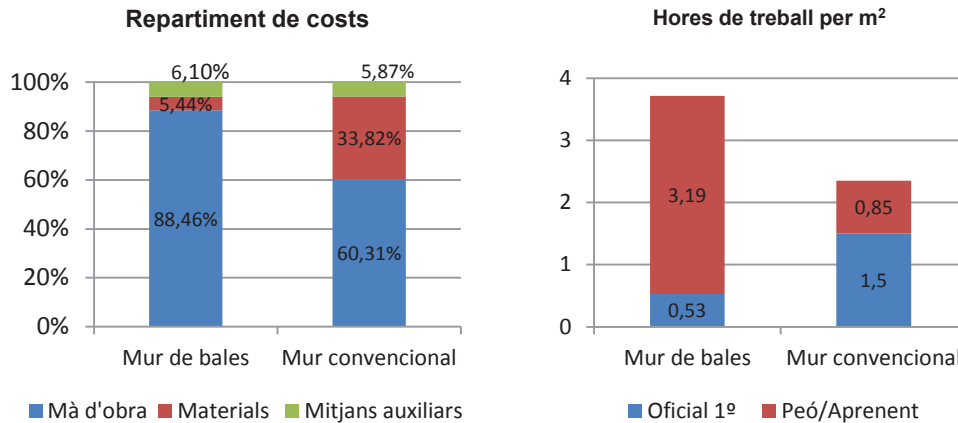
D'acord amb la mateixa base de preus consultada anteriorment, el cost d'aquest tancament seria el següent:

D0706.0020	m2	Fabrica ladrillo hueco de 14 cm esp. (H-16) tomado con mortero de cemento portland y arena 1:4	34,59	
B0001.0030	0,650 h	oficial 1 ^a	21,28	13,83
B0001.0060	0,325 h	Peon especializado	17,73	5,76
B1102.0060	20,000 u	Ladrillo H16 14x19x24	0,53	10,60
A0104.0120	0,018 m3	mortero c.p. y arena cantera 1:4	129,12	2,32
	6,400%	Medios Auxiliares	32,51	2,08
D0706.0060	m2	Fabrica ladrillo hueco de 8 cm esp. (H-6) tomado con mortero de cemento portland y arena 1:4	30,61	
B0001.0030	0,650 h	oficial 1 ^a	21,28	13,83
B0001.0060	0,330 h	Peon especializado	17,73	5,85
B1102.0030	32,000 u	Ladrillo H6 8x12x24	0,22	7,04
A0104.0120	0,015 m3	mortero c.p. y arena cantera 1:4	129,12	1,94
	6,800%	Medios Auxiliares	28,66	1,95
D1201.0050	m2	Aislamiento termico en camara entre fabricas con placas de poliestireno expand. de 40 mm esp.	12,86	
B0001.0030	0,200 h	oficial 1 ^a	21,28	4,26
B0001.0060	0,200 h	Peon especializado	17,73	3,55
B0303.0370	1,000 m2	Panel EPS. Densidad 20 kg/m3. 50 mm	4,50	4,50
	4,500%	Medios Auxiliares	12,31	0,55

Per tant, la suma d'aquests costs dona com a resultat un preu total de 78.06€/m². Gairebé 30/m² més que el preu del mur realitzat amb bales de palla i més de 60€/m², sense afegir el cost de mà d'obra.

Analitzant els valors dels preus descomposats es pot veure com hi ha un contraposició amb els rendiments de mà d'obra. D'una banda l'execució dels murs de bales de palla requeriren moltes hores de voluntaris (autoconstrucció) amb la complementació d'un treballadors amb experiència el

qual reparteix temps entre la direcció, la supervisió i l'execució de les tasques de majors complexitat. En canvi en el tancament convencional les hores de treball de l'oficial primera són més ($1.5h/m^2$) ja que és aquest qui domina la tècnica d'execució i l'executa mentre el peó s'encarrega de les feines més bàsiques ($0.855h/m^2$). Són dues formes de treball totalment diferents, l'un realitzada per "amateurs" o aprendents i l'altre per professionals.



Pel que fa als materials, s'observa una gran diferència de preu i en una important repercussió en el preu total de l'element. Mentre que en el mur convencional, el cost dels materials ascendeix a $26.5€/m^2$, el que suposa una tercera part del cost total. El cost dels materials del mur realitzat amb bales de palla és de $3 €/m^2$ ja que la resta de material emprat en la preparació del revestiment, com teles de sac i canyís i l'estructura de canyes són materials reciclats obtinguts a cost 0. Respecte al cost fictici obtingut ($50.77€ m^2$) representa un 5.4% del cost total. Per tant, a banda dels rendiments de mà d'obra, només considerant el cost dels materials ja s'observa una diferència de cost d'uns $23€/m^2$.

- Cost del revestiment base

Una vegada es tingué la superfície a punt es realitzà un arrebossat base amb morter d'argila mesclada amb palla. Per fer la mescla es compraren sacs d'argila en pols procedents d'una teulera. Aquesta es mesclà a obra amb àrid, palla i aigua en una proporció aproximada de 1:4 (argila:àrid). Es desconeix la quantitat de palla afegida, no obstant, el seu cost no afecta al preu final del revestiment.

Aquestes fase la dugué a terme una quadrilla de 5 obrers contractats, sense experiència en l'execució de revestiments d'argila, sota la direcció i la coordinació de Rikki Nitzkin. Es finalitzà la capa base dues setmanes després (10 dies laborals). El total d'hores dels obrers fou de 400hores ($5 \times 8\text{hores/dia} \times 10\text{dies}$). Si es té en compte que el revestiment és de les dues cares es va revestir un total de $191.60 \times 2 = 383.2m^2$. Això suposa un rendiment de $1.04h/m^2$. Es desconeix remuneració dels obrers contractats però al tractar-se d'obriers sense experiència en aquesta tècnica se'ls ha assignat el cost unitari de peó.

Per a determinar el cost del material s'ha de tenir en compte que s'aplicaren uns 6 cm de pasta d'argila a l'interior i 4 a l'exterior, el que suposa un gruix mitjà de 5cm. Per tant, sabent que la proporció és de 1:4 es requeriran aproximadament: $0.05\text{m}^3 \times 0.25 = 0.0125\text{m}^3$ d'argila en pols per m^2 de revestiment. El preu d'un metre cúbic d'argila en pols es troba al voltant de 38.35€ d'acord als preus obtinguts en diverses teuleres de l'illa.

MATERIAL	UNITATS	COST UNITARI	COST TOTAL
Argila en pols	0.0125m ³	38.35€/m ³	0.48 €
Arena comú (cero)	0.04m ³	45.07€/ m ³	1.80 €
Peó	1.04h/m ²	17.73€/h	18.44 €
Oficial de 1 ^a (R.Nitzkin)	0.21 h/m ²	21.28€/h	4.46 €
Mitjans auxiliars (4.5%)	0.045	25.19€	1.13 €
COST TOTAL(m²)			26.32 €

Per als revestiments interiors, pels quals no es requeriren bastides, en la seva majoria, per a la seva aplicació el cost és comparable amb un arrebossat regletejat amb morter de ciment i arena.

D0901.0040 m2 Enfoscado maestreado con mortero de cemento portland y arena 1:4 en paramentos			18,67
vert.es int.es			
B0001.0030	0.550 h oficial 1 ^a	21,28	11,70
B0001.0060	0.275 h Peon especializado	17,73	4,88
A0104.0120	0.012 m3 mortero c.p. y arena cantera 1:4	129,12	1,55
	3.000% Medios Auxiliares	18,13	0,54

En aquest cas, el pes dels rendiments de la mà d'obra és el que marca la diferència i suposa un major cost al revestiment del mur de bales de palla. S'ha de tenir en compte que en el gruix de revestiment d'argila és de 5cm mentre que la capa de morter de ciment i arena és de poc més d'1cm. Per tant, com que s'apliquen en els dos casos de forma manual és clar que en el primer cas el temps d'execució per m^2 serà superior. Si s'hagués aplicat el morter d'argila amb una màquina de projecció el rendiment hauria estat molt més elevat i s'haurien requerit menys treballadors

Pel que fa als materials, el major gruix de revestiment també implica un major cost. No obstant, el seu pes no és rellevant en el cost global. Considerant la possibilitat d'utilitzar l'argila del terreny, per començar es podria haver eliminat el cost de l'argila en pols i l'arena. Ara bé, a nivell de cost econòmic s'hauria de tenir en compte el temps necessari per fer el triatge del fang.

El cost de muntatge i desmuntatge de bastides i el seu lloguer s'hauria de comptabilitzar només per a paraments exteriors. Aquest cost, d'acord a la Base de Preus de la Construcció del Col·legi Oficial d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Mallorca. Edició de 2010 és d'uns 16€/m². Per tant el cost total s'incrementaria fins a **42.32€/m²**.

Posteriorment s'aplicà una argamassa fina de transició a base d'argila, calç i palla i diverses capes fines de calç en pasta amb additius putzolònics tant a l'interior com a l'exterior. Es tracta d'un revestiment totalment diferent al que s'havia pressupostat i dels quals no es disposa de cap tipus d'informació referent al seu cost ni hores invertides.

Per tant, d'acord als preus obtinguts el cost total del tancament, a falta de l'execució del revestiment d'acabat seria de 83.65€/m². Això suposa un cost d'execució material total de 16027€ pels 191.60m² de tancament.

Modificant en el pressupost inicial presentat anteriorment les partides dels capítols marcats en vermell el pressupost d'execució material ascendiria a **188176€**. Per tant, el cost d'execució material per 219.92m² de superfície construïda (incloent pèrgola i piscina) seria aproximadament de 855.67€/m². S'hi hauria d'afegir el cost del revestiment d'acabat que no faria variar gaire el cost final.

Per poder comparar aquest cost d'execució unitari amb algun valor de referència s'ha determinat el cost d'execució material d'acord el mètode ideat per l'Institut Valencià de l'Edificació (amb preus molt semblats als de les Illes Balears). A partir del Mòdul Bàsic d'Edificació (MBE), el qual representa el cost d'execució per metre quadrat construït d'una edificació realitzada en condicions i circumstàncies convencionals d'obra. Aquest mòdul és pondera amb sis coeficients que tenen en compte: el tipus d'edificació, el número de plantes, la situació, el número d'habitatges, la superfície útil i la qualitat dels acabats.

D'acord amb aquestes mètode, tenint en compte un MBE estimat de 610€/m² i una qualitat de d'acabats mitjana, el cost unitari d'execució de l'edificació és de 714.74€/m². Com es pot veure aquest cost d'execució material per m² és notablement inferior a la construcció realitzada amb bales de palla (855€/m²). No obstant s'ha de tenir en compte que es tracta d'un preu estimat i pot variar en funció del mòdul del bàsic i dels coeficients que s'apliquin però permet tenir un idea del cost d'un edificació d'aquest estil.

$$CUE = PEM/Sc = MBE \times Ct \times Ch \times Cu \times Cv \times Cs \times Cc$$

Ct TIPOLOGÍA EDIFICACIÓN	Ch Nº DE PLANTAS	Cu UBICACIÓN CENTRO HISTÓRICO
<input type="radio"/> (1.000) Entre medianeras	<input checked="" type="radio"/> (0.975) nº de plantas < 3	<input checked="" type="radio"/> (1.000) No
<input type="radio"/> (1.050) Abierta	<input type="radio"/> (1.000) 3 < nº de plantas < 8	<input type="radio"/> (1.250) Si
<input type="radio"/> (1.100) En hilera	<input type="radio"/> (1.025) nº de plantas > 8	
<input checked="" type="radio"/> (1.150) Unifamiliar aislada		
Cv Nº DE VIVIENDAS	Cs SUPERFICIE ÚTIL VIVIENDAS	Cc CALIDADES
<input type="radio"/> (0.900) nº de viviendas > 80	<input checked="" type="radio"/> (0.950) S viviendas > 70m ²	<input type="radio"/> (0.800) Básico
<input type="radio"/> (1.000) 20 < nº de viviendas < 80	<input type="radio"/> (1.000) 45m ² < S viviendas < 70m ²	<input checked="" type="radio"/> (1.000) Medio
<input checked="" type="radio"/> (1.100) nº de viviendas < 20	<input type="radio"/> (1.050) S viviendas < 45m ²	<input type="radio"/> (1.200) Alto

Coste Unitario de Ejecución (PEM/Sc) = 714,74 €/m2

Edificación residencial unifamiliar aislada con una altura menor o igual a 3 plantas, de menos de 20 viviendas de una superficie útil media de 70m² y de un nivel medio de acabados.

Font: <http://www.five.es/inicio/economia/457.html>

El fet de tractar-se d'un habitatge unifamiliar aïllat amb un disseny particular i diverses prestacions "extres" com la piscina, el sol radiant o l'estructura de fusta kvh fan que el preu d'execució s'incrementi. Per altra banda, seria interessant veure quin és la demanda energètica de cada construcció. El bon comportament tèrmic de la construcció amb bales de palla suposaria un

reducció important en el cost de la climatització i escalfament de l'habitatge que amb els anys suposa un estalvi econòmic important.

10.3. Superfície útil

Un dels principals inconvenients dels murs realitzats amb bales de palla és l'important pèrdua de superfície útil que suposen. En terrenys rurals aquest factor possiblement no és tan rellevant però en zones urbanes i en aquells indrets en que el preu del sòl és molt valorat serà un factor a tenir en especial consideració.

En el cas que ens ocupa, el gruix dels murs de tancament és aproximadament de 45cm de l'amplada de la bala, més 10cm (4+6) de revestiment a base d'argila i uns 2.5cm per banda de morter de calç. Per tant si considerem únicament els murs exteriors la pèrdua total serà de $43.95 \times 0.60 = 26.36\text{m}^2$. Si es té en compte que la superfície construïda en planta baixa és de 117.83m^2 el percentatge de pèrdua és del 22.4%. Si s'afegeix la superfície construïda que es perd en les divisions interior i zones de pas d'instal·lacions la pèrdua s'eleva fins als 33.39m^2 . Per tant la pèrdua total és de més d'una quarta part (28%) de la superfície total construïda, un xifra més que significativa.

Seguint amb la comparació anterior, es calcularà la pèrdua de superfície útil que suposaria l'execució del tancament convencional emprat en l'anàlisi de cost: fàbrica de maons de 14cm (H-16), una capa d'aïllament a base de plaques de poliestirè extruït de 5cm d'espessor i fàbrica de maons de 8cm (H-6). Si s'afegeixen uns 4 cm de revestiments, en total suposa uns 31cm de gruix. Per tant la pèrdua d'espai serà de 13.98m^2 , aproximadament la meitat de la pèrdua del mur realitzat amb bales de palla. Per tant, per a cada metre lineal de tancament es perd el doble superfície útil.

Aquests gairebé 13m^2 de diferència de pèrdua representen més d'una dècima part de la superfície construïda, cosa que té una repercussió remarcable a nivell econòmic.

10.4. Aïllament tèrmic

Per tenir una referència del grau d'aïllament s'ha realitzat el càlcul de comprovació de limitació de demanda energètica que exigeix el document bàsic HE-1. D'acord amb els càlculs l'envolupant de l'habitatge compleix amb molt marge les exigències definides d'acord a la zona climàtica a la qual pertanyen les Illes Balears. A continuació es presenta un quadre de resum dels càlculs realitzats i que es poden consultar a l'Annex 10.

Tancaments i particions interior de l'envoltant tèrmica	Umàx (projecte)	Umàx
Murs façana	0.18 W/m ² K	1.07 W/m ² K
Primer perímetre de sòls recolzats i murs en contacte amb el terreny	-	1.07 W/m ² K
Divisions interior en contacte amb espais no habitables	0.72 W/m ² K	1.07 W/m ² K
Terres	0.35 W/m ² K	0.68 W/m ² K
Cobertes	0.14 W/m ² K	0.59 W/m ² K
Vidres i marcs de buits i claraboies	2.65 W/m ² K	5.70 W/m ² K

Murs de façana	U _{Mm}	U _{Mlim}
N	0.10 W/m ² K	0.82 W/m ² K
E	0.18 W/m ² K	0.82 W/m ² K
O	0.13 W/m ² K	0.82 W/m ² K
S	0.14 W/m ² K	0.82 W/m ² K

Buits	U _{Hm}	U _{Hlim}
N	2.65 W/m ² K	4.70 W/m ² K
E	2.65 W/m ² K	5.70 W/m ² K
O	2.65 W/m ² K	5.70 W/m ² K
S	2.65 W/m ² K	5.70 W/m ² K

Terra	
U _{Sm}	U _{Slim}
0.35 W/m ² K	0.52 W/m ² K

Coberta	
U _{Sm}	U _{Slim}
0.14 W/m ² K	0.45 W/m ² K

Tal com informen els propietaris, el bon comportament tèrmic de l'habitatge redueix al màxim l'aportació externa d'energia i redueix el consum energètic notablement:

“Aquests dies que s'han assolit temperatures exteriors de 43.7°C i 5% d'humitat (agost del 2012), a l'interior de l'habitatge ens trobàvem a 24°C i un 50% d'humitat sense necessitat d'aparells de climatització. La temperatura interior pot ser inferior si la nit abans la temperatura ha baixat per sota de 20°C. Sense elements de climatització la sensació és de trobar-se en una caverna.

Al hivern, els dies de més fred (al voltant dels 0°C) amb nivells d'humitat relativa superiors al 90%, amb una petita aportació de calor (es manté encesa l'estufa de biomassa durant un parell d'hores) la calor es manté estable durant tota el dia i la temperatura es sosté al voltant dels 21- 22°C amb una humitat de entre el 55% i el 65%. En temperatures exteriors baixes (al voltant del 10°C) però en dies assolellats no es requereix cap tipus d'aportació de calor i la temperatura i la humitat es mantenen constants (20-22°C, HR inferior al 65%). Mentre que les cases del voltant encenen la xemeneia a finals d'octubre, nosaltres fins al gener no la necessitem i quan s'encén és durant breus períodes de temps”.

Si es té en compte aquest comentari del comportament real de l'habitatge l'aportació d'energia per el condicionament tèrmic de l'habitatge és mínim. Únicament suposa el cost de la llenya o les closques d'ametlla que s'utilitzen com a combustible de l'estufa que, possiblement, s'obtenen dels arbres de la finca.

Queda demostrat per tant que l'execució del sòl radiant és completament innecessària. En un clima on la temperatura no és extrema en els mesos d'hivern i on la majoria dels dies són assolellats resulta totalment inapropiada l'elecció d'un sistema de calefacció més propi de climes

on les temperatures són baixes de forma continua i el sòl radiant es manté en funcionament de forma ininterrompuda durant llargs períodes de temps.

La necessitat d'un sistema "superaïllant" en climes de temperatures relativament suaus és un punt que genera importants debats. És evident que aquest tipus de construccions seran especialment útils en climes extrems, tant de temperatures molt elevades com molt baixes. En aquests casos l'estalvi energètic serà tal que resultarà econòmicament molt rentable i permetrà assolir un confort interior excel·lent respecte al clima exterior. En canvi en climes més suaus, com és el de Mallorca, la capacitat de regulació tèrmica i higroscòpica serà menys necessària i es requerirà només en determinades èpoques. Per tant, seria important realitzar un estudi de la demanda energètica i del cost que suposa la climatització i la refrigeració de l'habitatge per veure quin nivell d'estalvi energètic i econòmic es pot assolir. S'ha de tenir en compte que el cost econòmic que suposa la calefacció d'un edifici al llarg de la seva vida útil, representa una part gens menyspreable.

CONCLUSIONS FINALS

En línies generals, es pot considerar que aquest Treball Final de Màster han complert gairebé tots els objectius fixats en la seva proposta. Partint d'un desconeixement quasi total de les construccions realitzades amb bales de palla s'ha elaborat un treball ben argumentat i bastant complet en el que s'analitzen els aspectes més importants d'aquest tipus de construccions en base a una àmplia bibliografia d'assajos i estudis.

Aquest treball obre la possibilitat d'aprofundir en la investigació al voltant de la palla amb estudis més específics que ampliïn les seves possibilitats d'ús i en millorin les prestacions. Aquest punt és la base per a que aquest material pugui assolir certa confiança en el món de la construcció, des de promotors fins a constructors passant per tècnics i projectistes, i que es pugui fer un lloc en el complex mercat de la construcció actual.

En aquest sentit considero que aquest estil constructiu presenta un important valor afegit i diferenciador respecte a la construcció convencional: l'ús de materials naturals en un sistema força simple i que ofereix bones prestacions. Però per a que aquest tipus de construcció tingui futur s'han de valorar aspectes com la reducció de l'energia incorporada o d'emissió de CO₂ dels materials, l'assoliment d'un condicionament passiu de la construcció, l'ús de materials naturals i no contaminants, etc. Alguns d'aquests factors són difícilment quantificables a nivell econòmic però tenen una repercussió important en el confort i en la salut dels seus habitants i del entorn que ens envolta.

Pel que fa a l'anàlisi del material, la bala de palla destaca per tenir una excel·lent capacitat per absorbir moviments sísmics, un elevat poder de recuperació de deformacions, un extraordinari aïllament tèrmic i unes notables propietats higroscòpiques. No obstant, si no s'assegura la seva durabilitat totes aquestes propietats es perden i el material deixa de ser vàlid. En aquest sentit, la seva protecció i el control de la humitat són fonamentals. Un aspecte clau per assegurar les bones propietats de la palla serà el control de qualitat. Amb aquesta finalitat seria important establir un procediment de control i unes exigències a complir (grau d'humitat, densitat, absències de restes orgàniques, correcte fermat, etc) que permetin assegurar un producte de qualitat.

Un dels principals condicionants del l'ús de les bales de palla en la construcció és la pèrdua de superfície útil que suposa. Per aquest motiu la seva utilització no sembla viable en nuclis urbans i zones on el preu del terreny és més elevat. L'ús de les bales col·locades de cantell permet reduir en part aquesta pèrdua de superfície i les conseqüències econòmiques que això implica.

A partir de l'anàlisi d'un cas real s'han plantejat altres qüestions referents al sistema de treball i la seva relació directa amb el cost econòmic de la construcció. Partint de la base que el cost dels materials té un pes menys significatiu en el total que el cost de la mà d'obra, la relació entre els paràmetres cost mà d'obra - temps - qualitat definirà el mètode de treball.

En construccions a petita escala, poc condicionades pel temps, més “familiars”, principalment habitatges, la autoconstrucció pot resultar molt interessant. No obstant, és important que es disposi de persones d'experiència i coneixements suficients per a dirigir i coordinar els treballadors més inexperts. La qualitat del producte final variarà molt en aquests casos en funció de l'experiència, la cura i la habilitat dels treballadors. Per tant, el cost serà generalment baix però la qualitat i el temps d'execució seran variables i difícils de d'assegurar.

Un dels sectors que considero que pot tenir un paper fonamental en el futur desenvolupament de les bales de palla com a material de construcció és el de la prefabricació. El sistema de producció a taller i el muntatge ràpid de mur modulars a obra resulta especialment interessant ja que minimitza alguns dels principals inconvenients de les tècniques “convencionals” de construcció amb bales de palla: redueix l'exposició de la palla als agents climàtics, racionalitza les operacions de treball, minimitzant la modificació de bales, incrementa el control sobre el producte final. I sobretot, garanteix una estàndard de qualitat a un cost prefixat i amb un temps d'execució definit.

Pel que s'ha vist, sembla que el desenvolupament d'aquest tipus de construcció necessita l'aparició d'empreses especialitzades que coneguin bé el material i la tècnica constructiva. A nivell normatiu, la creació d'una guia o instrucció oficial permetria fixar uns requeriments a complir i es facilitaria el control de qualitat. A partir d'aquest punt resultaria més fàcil assolir la seva implantació en el mercat.

Un mostra de les possibilitats que ofereix la palla és que en els darrers anys han sorgit productes industrials que han demostrat tenir bones prestacions com plafons de nucli de palla, els plafons OSSB o blocs de palla comprimida. Alguns d'aquests productes tenen el potencial per fer-se un lloc en el mercat de la construcció i reduir així el consum de fusta.

En conclusió d'acord amb el que s'ha vist en els diferents assajos i estudis realitzats es pot afirmar que les construccions amb bales de palla, ben executades, poden ser competitives a nivell de prestacions respecte a les construccions convencionals ja que ofereixen un excel·lent comportament tèrmic i un bon aïllament acústic, una resistència estructural vàlida per a edificacions senzilles, una notable resistència al foc i una gran ductilitat en cas de sisme. A nivell econòmic, el rang de costos és molt ampli i depèn de moltes variables. La important pèrdua de superfície útil és un factor que apuja el cost per m² i abaixa la seva competitivitat. Per contra, el bon comportament tèrmic suposa un estalvi energètic molt gran que a la llarga pot amortitzar les conseqüències econòmiques que deriven d'aquesta pèrdua de superfície útil.

És important deixar clar que l'ús de la bales de palla en construcció no pretén ni pot ser una alternativa per a tot tipus de construccions ja que, com tota tècnica constructiva, té les seves limitacions. No obstant, el seu ús pot ser una alternativa molt vàlida al formigó i al “totxo” per a habitatges unifamiliars i adossats, construccions agrícoles i naus industrials de poca alçada i edificis públics. Amb el temps i amb el desenvolupament de la tècnica, les seves aplicacions es podrien estendre a construccions més complexes. Però per això fa falta que el país s'impliqui en aquest desenvolupament i apareguin investigacions pròpies, assaigs, certificacions que recolzin la seva utilització i en facilitin la normalització en la societat.

AGRAÏMENTS

Abans de concloure amb aquest treball voldria donar les gràcies a aquelles persones que m'han ajudat a la seva elaboració i que han fet possible que assolís els objectius que m'havia marcat.

Vull agrair al tutor d'aquest TFM, el senyor Agustí Portales Pons, el temps dedicat en les seves correccions i al seu esperit crític que m'ha permès adonar-me de les mancances i assolir un treball més complet.

En segon lloc, vull donar les gràcies a l'arquitecte Rafael Sala Nowotny, qui m'ha ajudat amb tot el que ha pogut en l'estudi del cas real i m'ha proporcionat la informació i els contactes necessaris per incrementar el meus coneixements. L'intercanvi d'opinions m'han permès entendre millor la construcció analitzada i, en general, aprofundir en aquest nou material.

Els meus últims agraïments són per els amics i companys de professió que m'han animat i m'han ajudat en el que han pogut a fi de que sorgís aquest TFM i em permetés completar els meus estudis de Màster.

BIBLIOGRAFIA

Llibres

Amazon Nails, 2001. Information guida to straw bale building. Regne Unit.

Corum, Nathaniel. *Building a straw bale house: The Red Feather Construction Handbook*. Princeton Archirectural Press.

Hodge, Brian. 2006. *Building your straw bale home: from foundations to roof*. Csiro Publishing. Australia.

Holis, Murray. 2005. *Practical straw bale building*. Landlinks Press. Australia Swentzell, Athen.

King, Bruce. 2006. *Design of Straw Bale Buildings: The State of the Art*. Green Building Press. Estat Units.

Minke, Gernot. Mahlke, Friedemann. 2006. *Manual de construcción con fardos de paja*. Montevideo. Editorial Fin de siglo.

Magwood, Chris. Mack, Peter. Therrien, Tina. 2005 *More Straw Bale Building: A Complete Guide to Designing and Building with Straw*. New Society Publishers. Canadà.

Steen, Bill. Bainbridge, David. Eisenberg, David. 1994. *The Straw Bale House*. Chelsea Green Publishing Company. Vermont.

Publicacions científiques

Ayes, Katrina. 2000. ASTM E84-98. Surface Burning Characteristics.001, Straw Bale. Estats Units.

Ash C.; Aschheim M.; Mar D.; King B.2004.. *Reversed cyclic in-plane tests of load-bearing plastered straw bale walls*. Vancouver, Canadà.

Atkinson, Carol. 2008. *Energy Assessment of a Straw Bale Building*. University of East London. Regne Unit.

Carro, Francisco. 2010. *La viabilidad técnica de la construcción con paja*. Valladolid, Espanya.

Carter, Graham. Jain, Prerna. Hou, Jeff. 1996. *Report on the Physical Performance of the Real Goods Solar Living Centre Retail Showroom*. University of California. Berkeley. Estats Units.

Donovan, Darcey, et. al. 2009. Seismic performance of innovative straw bale walls systems. Pakistan Straw Bale And Appropriate Buildings. Pakistan.

Ecological Building Network, 2007. 1-Hour fire resistance test of a non-loadbearing straw bale wall. Califòrnia, Estat Units.

Faine, Michael; Zhang, John. 2000. *A Pilot Study examining the Strength, Compressibility and Serviceability of Rendered Straw Bale Walls for Two Storey Load Bearing Construction*. University of Western Sydney, Australia.

Faine, Michael; Zhang, John. 2002. *A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an earth rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall*. University of Western Sydney, Australia.

Joseph J. Bilello, Ph.D., A.I.A. Russell R. Carter, E. I. T.1999. *Missile Perforation Threshold Speeds for Straw Bale Wall Construction with a Stucco Finish*. Texas Tech University. Estats Units.

Rakowski, M.R.; MacDougall, C. 2009. *Compressive strength testing of plastered strawbale walls subjected to non-uniform loading*. Regne Unit.

Straube, John; Schumacher, Chris. *Monitoring the Hygrothermal Performance of Strawbale Walls*. Califòrnia. Estats Units.

Vardy, Stephen; MacDougall, Colin. 2006. *Compressive testing and analysis of plastered straw bales*. Regne Unit.

Walker, Peter. 2004. *Compression load testing straw bale walls*. Dept. Architecture & Civil Engineering, University of Bath.

Treballs acadèmics

Carro Castro, Francisco Javier. 2007. Projecte Final de Carrera. *Construcción con balas de paja. Estudio de las propiedades de la paja embala y su utilización como material de construcción*. Galicia.

Marks, Leanne R. 2005. *Straw-bale as a viable, cost effective, and sustainable building material for use in southeast Ohio*. Estats Units.

Revistes

Brizna. Red de Construcción con paja. Tots els volums.

Ecohabitar. Volums diversos.

Planes web

www.arquitectura-y-paja.org → Greb España

www.casasdepaja.org Red de Construcción con Paja

www.casadepaja.es

<http://casaeco.blogspot.com.es>

www.chrismagwood.ca/ → Web personal de Chris Magwood

www.ecobuildnetwork.org → Ecological Building Network

glassford.com.au → Huff 'n' Puff Strawbale Constructions

lapajaenlaconstruccion.wikispaces.com/

www.paksbab.org → Pakistan Straw Bale and Appropriate Building

www.osbbc.ca → Ontario Straw Bale Building Coalition

rikkinitzkin.wordpress.com/ → Web personal de Rikki Nitzkin

www.s-house.at → S-House Balanced Technologies

www.strawbale.com

Altres fonts d'informació

Reportatge televisiu “ ¿Paja Mental? Redescubriendo un material antiguo?.