

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BOLOGNA

Scuola di Ingegneria e Architettura

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali

Corso di Laurea in INGEGNERIA GESTIONALE

Tesi di Laurea

in

VALORIZZAZIONE DELLE RISORSE PRIMARIE E SECONDARIE

**Valutazioni ambientali mediante
Life Cycle Assessment (LCA)
sui mattoni in terra cruda:
il caso studio di Pabillonis**

Candidato:
Marco Tomasi

Relatore:
Prof.ssa Ing. Alessandra Bonoli

Correlatori:
Arch. Laura Demerciari
Ing. Sara Rizzo
Arch. Alceo Vado

Anno Accademico 2012/2013 - Sessione II

*a Francesca, Mattia e Filippo, per la gioia di vivere
che mi hanno trasmesso con i loro sorrisi*

Ringraziamenti

Questi ringraziamenti sono certamente rivolti a chi mi ha accompagnato nello sviluppo di questo studio, ma anche a chi mi è stato accanto in questi anni permettendomi di affrontare ogni giorno con lo spirito necessario a portare a termine la mia carriera universitaria.

Grazie innanzitutto alla Prof.ssa Alessandra Bonoli, per avermi permesso di trattare un tema strettamente collegato con la Terra nella quale sono nato e cresciuto e alla quale sono profondamente legato. Grazie all'Arch.Laura Demerciari e all'Ing.Sara Rizzo che mi hanno affiancato. Grazie all'Arch.Alceo Vado per la passione dimostrata per il tema terra cruda, per avere fortemente voluto seguire da vicino questo studio, per aver messo a disposizione il suo tempo e le sue competenze e per il materiale che mi ha concesso per la stesura di questo lavoro. Grazie all'Ing.Paolo Neri che, senza pensarci troppo, ha deciso di accogliermi sotto la sua ala mettendosi generosamente a disposizione. Ringrazio inoltre il Geom.Giancarlo Collu, il Geom.Emilio Podda dell'impresa Il Concio Costruzioni, il vice sindaco del Comune di Pabillonis Riccardo Sanna, la ditta Fratelli Coni, l'Ing.Alessio Bellu, Walter Secci, l'Ing.Stefano Cadeddu e tutti coloro che mi hanno aiutato nella fase di reperimento dati mettendo a disposizione il loro tempo e il materiale di cui disponevano.

Grazie ad Alessandra, perchè mi sta accanto, mi sostiene e sopporta ogni giorno, anche a centinaia di chilometri di distanza.

Un ringraziamento particolare va ai Novelli e a Paolo, Runa, Pippo, Franz, Gengi, Emanuela, Davide, Silvia, Piera e Giorgio.

Grazie agli amici di sempre, quelli Sardi, perchè c'erano quando questo lungo percorso è iniziato e ci sono ancora oggi che sono arrivato al termine.

Grazie ai miei colleghi, perchè mi hanno aiutato a raggiungere costantemente dei buoni risultati facendomi affrontare con maggiore serenità gli studi.

Grazie alla mia grande famiglia, della quale faccio fatica a descrivere i confini. In particolare grazie alle mie sorelle ed a mio padre e mia madre che, con la loro fiducia, mi hanno permesso di arrivare sin qua. Spero tutto sommato di averla ripagata.

Infine grazie a me, per esserci riuscito, per essere andato avanti quando mollare tutto sarebbe stato facile, per essermi convinto che nella vita niente è impossibile se davvero lo vuoi.

Introduzione	5
1 Le Tecnologie Site Specific	7
1.1 Ambiti di applicazione	9
1.1.1 Acqua	9
1.1.2 Igiene	11
1.1.3 Energia	11
1.1.4 Abitazioni	12
1.1.5 Trasporti	13
1.1.6 Sanità	13
1.1.7 ICT	14
1.1.8 Finanza	14
1.1.9 Alimentazione	16
2 La Terra Cruda	17
2.1 Storia	17
2.2 Composizione del materiale e caratteristiche	21
2.2.1 L'acqua e gli altri additivi per la formazione dell'impasto . .	23
2.3 Le tecniche costruttive	24
2.3.1 Adobe	25
2.3.2 Pisé	28
2.3.3 Torchis	30
2.3.4 Mattoni in Terra Compressa	30
2.3.5 Bauges	32
2.3.6 Terra-Paglia	33
3 Pabillonis - La Casa di Cultura delle Terre	35
3.1 Cenni di storia urbana	35
3.2 La Casa di Cultura delle Terre	36
3.2.1 I dati raccolti	39

4	L'analisi ambientale con il metodo LCA	55
4.1	Le caratteristiche principali dei metodi	56
4.1.1	Eco-indicator 99	56
4.1.2	IMPACT 2002	57
4.1.3	Il metodo EPS 2000	58
4.1.4	Il metodo EDIP 2003	60
4.1.5	Il metodo IPCC 100a 2007	61
4.1.6	Confronto tra i metodi IMPACT 2002, EDIP e IPCC per il calcolo della CO ₂ eq	61
4.1.7	La scelta di un metodo	61
4.2	Il Codice di Calcolo	62
5	L'LCA del ciclo di vita di un mattone in terra cruda	63
5.1	Obiettivo dello studio e campo di applicazione	63
5.1.1	Obiettivo dello studio	63
5.1.2	Campo di applicazione	63
5.2	Inventario	64
5.2.1	<u>Produzione mattoni in terra cruda</u>	65
5.2.2	<u>Uso del mattone in terra cruda</u>	73
5.2.3	<u>Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)</u>	76
5.3	Analisi dei risultati	78
5.3.1	Il processo <u>Ciclo di vita di un mattone di terra cruda</u>	78
5.4	Conclusioni	87
6	L'LCA del confronto tra una muratura in terra cruda e una in laterizio a parità di capacità portante	89
6.1	Obiettivo dello studio e campo di applicazione	89
6.1.1	Obiettivo dello studio	89
6.1.2	Campo di applicazione	89
6.2	Inventario	90
6.2.1	La parete in terra cruda	90
6.2.2	La parete in laterizio	95
6.3	Confronto di una muratura in terra cruda e una in laterizio a parità di capacità portante	102
6.3.1	Confronto tra la malta di terra e quella cementizia	104
6.4	Conclusioni	105
7	Analisi dei Costi Esterni	107
7.1	Calcolo del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u> con EPS	107
7.2	Calcolo del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u> con Eco- indicator 99	109
7.3	I costi esterni e i costi interni	115
	Conclusioni generali	117
	Allegati	119

Introduzione

L'idea per questo lavoro nasce dall'interesse suscitato nel sottoscritto dagli argomenti trattati nel corso di Valorizzazione delle Risorse Primarie e Secondarie. In particolare, attirato dal tema delle tecnologie appropriate, ho avuto la possibilità di riscoprire un materiale, la terra cruda, tradizionalmente utilizzato per le abitazioni del territorio da cui provengo, la piana del Campidano in Sardegna. Inoltre ho avuto modo di approfondire lo studio di una metodologia di studio, quella dell'LCA, che rappresenta un ottimo strumento di supporto per le decisioni aziendali, e non solo, per le imprese.

Nel primo capitolo è presente una breve descrizione delle cosiddette tecnologie *site-specific*, dei cenni storici sul movimento culturale che le accompagna e una serie di esempi per ognuno dei settori in cui tali tecnologie vengono sviluppate.

Il secondo capitolo è dedicato interamente alla terra cruda, alla descrizione del materiale e delle sue caratteristiche essenziali. Vengono brevemente presentati pregi e problemi di utilizzo, nonché le più diffuse tecniche costruttive che ancora oggi usano la terra cruda.

Il capitolo terzo è incentrato sull'intervento di ristrutturazione di un edificio sito nel Comune di Pabillonis, che è stato assunto come caso di studio per questo lavoro. Corredate da numerose immagini, all'interno di questa sezione è presente la descrizione stessa dell'edificio e degli interventi che sono stati realizzati.

Il capitolo quattro descrive la metodologia di valutazione LCA, con la quale è possibile condurre le varie analisi, con la specifica per ognuna di come vengono determinati i valori delle diverse categorie di "danno". Sono state inoltre evidenziate le diversità fra i principali metodi oggi utilizzati.

Nel quinto capitolo è riportata l'analisi LCA specifica del mattone in terra cruda. E' presente un inventario in cui sono descritti i vari processi che si creano in fase di produzione, uso e "fine vita" del mattone; il tutto in relazione ai diversi dati raccolti nella ricerca sul campo e con quelli stimati. Vengono infine presentati i network, i diagrammi e tutti i report dei processi di caratterizzazione, damage assessment, weighting e valutazione.

Il capitolo sei presenta una valutazione LCA di raffronto fra un'unità di parete portante, stimata in un metro quadrato, realizzata una in mattoni di terra cruda e

l'altra in mattoni cotti, oggi più noti con il termine di laterizi¹. E' inoltre presente anche la valutazione specifica sui due tipi di malta per l'allettamento dei mattoni, quella in terra cruda e quella a base di cemento.

Nel settimo capitolo si trova un'analisi dei costi esterni fatta sul ciclo di vita del mattone di terra cruda utilizzando il metodo EPS e il metodo Eco-indicator 99.

¹Per fonte diretta, l'arch. Alceo Vado mi ricorda che per i Romani l' Opus latericium era quello propriamente in mattoni di terra cruda, benché oggi si designi invece l' Opus testaceum o doliare come Edilizia in laterizio. Cfr. in proposito N.Pevsner, J.Fleming e H.Honour - Dizionario di architettura - Einaudi, Torino 1966. Voce "Opus".

CAPITOLO 1

Le Tecnologie Site Specific

Nella seconda metà del 1900 l'economista e filosofo tedesco, Ernst Friedrich Schumacher attraverso il suo lavoro 'Small is Beautiful', dà il via al movimento ideologico delle *tecnologie appropriate*, dette anche tecnologie *site-specific*. Schumacher nel suo libro evidenzia alcuni problemi rilevanti presenti nella società contemporanea:

- la diminuzione delle scorte mondiali di risorse naturali come ad esempio i combustibili fossili;
- i danni provocati all'ambiente attraverso l'utilizzo di sostanze artificiali;
- l'atteggiamento degli uomini nella vita di tutti i giorni, che porta a degrado sociale ed ambientale.

Secondo l'economista tedesco le tecnologie appropriate rappresenterebbero una possibile soluzione a questi problemi, un modo diverso di concepire il nostro pianeta e la presenza della specie umana su di esso. La caratteristica principale di queste tecnologie è la loro adeguatezza al contesto in cui vengono sviluppate ed adottate. Da questo deriva la terminologia *appropriate* o *site-specific*. Certamente l'idea di Schumacher nasce dalla constatazione del processo feroce di sviluppo dei paesi occidentali e della successiva imposizione, da parte di questi, di tecnologie avanzate nelle colonie e, più in generale, nei paesi in via di sviluppo. Da qui si evince la convinzione che sia necessario un cambiamento nei piani di sviluppo, sostituendo il paradigma tradizionale dell'industrializzazione e della mercificazione delle risorse con nuovi piani basati sulla qualità della vita, sulla crescita culturale, sulla sostenibilità e sulla capacità di fare innovazione partendo dalle persone. Nel 1970 a seguito della crisi energetica, il concetto di tecnologia *site specific*, iniziò ad essere preso in considerazione anche per i paesi avanzati. A confermare una crescente presa di coscienza della tematica, nel 1977 il WHO (World Health Organization) mette in campo l'Appropriate Technology for Health Program e negli Stati Uniti d'America viene creato il National Center for Appropriate Technology. Dopo un iniziale boom di interesse, negli anni vi è poi stato un declino e diverse associazioni

e centri che si occupavano del tema hanno visto concludersi la loro esperienza. Le tecnologie appropriate sono però oggi entrate a far parte di un tema più vasto che è quello dello sviluppo sostenibile, in cui si introducono anche i concetti di durabilità e di utilizzo di risorse rinnovabili. Per descrivere meglio quando una tecnologia può essere definita appropriata è opportuno elencare alcuni tratti distintivi che le contraddistinguono:

- facilità di implementazione attraverso le risorse reperibili in loco;
- piccola scala;
- rispetto per gli equilibri e le leggi della natura;
- nessuna imposizione di tipo culturale, ideologico o tecnologico che non sia adeguata allo scenario ambientale e sociale;
- valorizzazione di tradizioni, usi, costumi e know-how delle persone coinvolte;
- miglioramento delle condizioni di vita;
- basso costo di realizzazione.

Parte di questi concetti vengono ripresi ed in alcuni casi rafforzati dall'UNESCO, nella Dichiarazione Universale sulla Diversità Culturale adottata a Parigi il 2 novembre 2001, dove si afferma che:

“ La cultura assume forme diverse nel tempo e nello spazio. La diversità si rivela attraverso gli aspetti originali e le diverse identità presenti nei gruppi e nelle società che compongono l'Umanità. [...] La diversità culturale amplia le possibilità di scelta offerte a ciascuno; è una delle fonti di sviluppo, inteso non soltanto in termini di crescita economica, ma anche come possibilità di accesso ad un'esistenza intellettuale, affettiva, morale e spirituale soddisfacente. [...] Ogni creazione affonda le sue radici nelle tradizioni culturali, ma si sviluppa a contatto con altre culture. Per questa ragione il patrimonio culturale, deve essere preservato in tutte le sue forme, valorizzato, e trasmesso alle generazioni future in quanto testimonianza dell'esperienza e delle aspirazioni dell'umanità, e al fine di alimentare la creatività in tutta la sua diversità [...]”¹.

Per ideare, sviluppare ed adottare una tecnologia site specific è necessaria una fase di progettazione che prenda le mosse da una analisi strutturale e tecnica ed una analisi economica e sociale del contesto in oggetto. E' necessario un grande lavoro di raccolta dati sul campo al fine di creare un quadro più dettagliato possibile ed evitare di incontrare degli imprevisti nel corso dello sviluppo. Quest'ultimo è suddiviso in alcune fasi:

1. *Identificazione dei problemi:* consiste nel capire quali siano le necessità del tessuto sociale e produttivo dell'area in cui si vuole intervenire;

¹Art.1, Art.3, Art.7 della Dichiarazione Universale dell'UNESCO sulla Diversità Culturale

2. *Impostazione*: si acquisisce conoscenza sulla conformazione del territorio e gli aspetti riguardanti l'ambiente e l'accessibilità a risorse quali acqua potabile ed energia, si inquadra la problematica specifica e si definiscono gli obiettivi;
3. *Sviluppo ed esecuzione*: in questa fase si individuano, progettano e realizzano le tecnologie più adatte in base al quadro scaturito dalle fasi precedenti, si svolgono sperimentazioni in laboratorio ed in loco e si verifica che la soluzione tecnica trovata sia sostenibile da un punto di vista ambientale, economico e sociale;
4. *Validazione in itinere*: questa fase è necessaria per capire se la scelta effettuata è realmente adeguata sotto il piano tecnico, ambientale, sociale ed economico;
5. *Validazione a progetto concluso*: si verifica l'effettiva sostenibilità del progetto a breve, medio e lungo periodo, assicurandosi che la tecnologia sia gestibile, efficace e migliorativa delle condizioni di vita dei soggetti che ne usufruiranno.

Negli anni sono state sviluppate tecnologie site specific appartenenti ad ambiti anche molto diversi fra loro. Di seguito vengono riportati alcuni esempi fra i più importanti nei diversi settori.

1.1 Ambiti di applicazione

1.1.1 Acqua

I fronti su cui era ed è ancora necessario intervenire con tecnologie appropriate in questo ambito particolare sono due. Infatti, l'emergenza in cui si trovano molte zone del nostro pianeta è relativa ai fattori della quantità e della qualità della risorsa. In pratica, non è sufficiente infatti l'accesso alla risorsa, ma è importante aver accesso ad acqua cosiddetta di buona qualità, di cui quindi si possa usufruire a 360 gradi. Un'acqua non purificata significa avere un alto fattore di rischio di contagio di malattie infettive che, proprio attraverso l'acqua, vengono trasmesse e diffuse. L'impossibilità di accedere ad un'acqua potabile per molte popolazioni del mondo è dovuta principalmente a tre fattori: inquinamento, cattiva gestione della risorsa, carenza della stessa. Le tecnologie appropriate sviluppate per risolvere il problema qualitativo sono:

- la bollitura, che consente la sterilizzazione di una piccola quantità di acqua ma può rivelarsi costosa in termini di energia;
- il filtro a candela (figura 1.1(a)), che è in grado di rimuovere particelle solide ed anche alcuni agenti patogeni;
- il filtro a sabbia, anch'esso capace di filtrare particelle solide ed agenti patogeni, di più semplice realizzazione ma necessità di maggiore manutenzione;
- il filtro a tessuto (figura 1.1(b)), usato in particolare per la rimozioni di agenti patogeni ma che non è efficace contro molti altri elementi di contaminazione;

- la disinfezione, realizzata inserendo nell'acqua delle sostanze che agiscono contro gli agenti patogeni eliminandoli;
- la dissalazione (figura 1.1(c)), realizzata attraverso apposti impianti, anche artigianali, di distillazione solare con cui è possibile purificare e dissalare anche le acque marine.



(a) Filtro a candela in ceramica



(b) Filtraggio con tessuto Sari



(c) Distillazione solare

Figura 1.1: Miglioramento qualità dell'acqua

Per quanto riguarda invece il problema quantitativo, anche qui sono numerose le tecnologie appropriate che sono state sviluppate ed applicate. Le principali sono:

- la raccolta dell'acqua piovana tramite cisterne, andando a creare un impianto che permetta di raccogliere l'acqua attraverso delle gronde pluviali e di convogliarla all'interno della cisterna (figura 1.2(a));
- la raccolta di acqua piovana tramite bacini, individuando o creando delle zone di avvallamento in cui si formi un bacino naturale di acqua piovana;
- le mini dighe, per creare dei piccoli bacini artificiali da cui poter attingere alla risorsa idrica, senza impattare pesantemente sulla conformazione del territorio (figura 1.2(b));

- la raccolta della nebbia, attraverso dei teli posizionati in zone particolarmente soggette a tale tipo di agente atmosferico, che permettano di raccogliere l'umidità e convogliarla in serbatoi appositi tramite un semplice sistema di tubazioni (figura 1.2(c));
- le pompe manuali, installate sul terreno che vanno ad intercettare una falda acquifera abbastanza superficiale (figura 1.2(d));



(a) Raccolta acqua con cisterna



(b) Mini diga



(c) Raccolta della nebbia



(d) Pompa manuale

Figura 1.2: Tecnologie per l'approvvigionamento d'acqua

1.1.2 Igiene

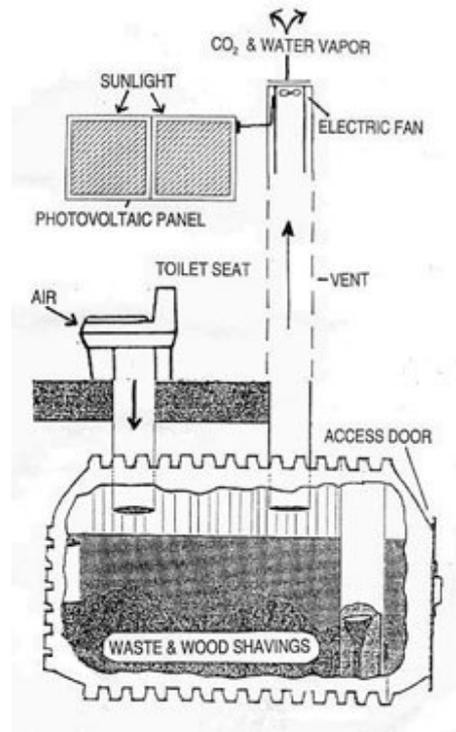
L'importanza degli aspetti igienici è emersa già parlando della qualità dell'acqua. Nei paesi in via di sviluppo (PVS) sono ancora oggi necessari interventi importanti per la realizzazione di un appropriato sistema di servizi igienico sanitari. La sfida è quella di trovare tecnologie che oltre ad integrarsi bene nel contesto, siano anche ecologiche quindi che prevedano un riciclo dei prodotti in modo da ridurre l'utilizzo di fertilizzanti sintetici in agricoltura. Un sistema che da delle risposte in tal senso è in particolare la composting toilet, che rappresenta una tecnologia molto semplice da mettere in pratica, in grado di abbattere gli agenti patogeni presenti nei reflui e nei sistemi più evoluti, utilizza accorgimenti per l'eliminazione di odori, la raccolta del percolato e la ventilazione della camera di compostaggio (figura 1.3(b)).

1.1.3 Energia

Nei PVS ed anche in molte aree rurali, l'assenza di infrastrutture pregiudica la capacità delle popolazioni di avere accesso ad energia utile per poter svolgere al-



(a) Una esempio composting toilet



(b) Diagramma sistema composting toilet

Figura 1.3: Il sistema composting toilet

cune attività utili, per esempio, ad intercettare e rendere disponibili risorse idriche di buona qualità. Esistono sistemi realizzabili su piccolissima scala che possono aiutare le persone a soddisfare alcuni bisogni essenziali:

- le pompe solari (figura 1.4(a)) attraverso l'energia raccolta con dei piccoli pannelli solari portano in superficie acque presenti nelle falde acquifere, andandole ad immettere all'interno di cisterne;
- il mini eolico (figura 1.4(b)) può risultare una alternativa in zone dove sfruttare questo tipo di energia è più semplice ed efficace rispetto a quella solare.

1.1.4 Abitazioni

Parlare di tecnologie appropriate nel settore edilizio si traduce spesso nel concetto di autocostruzione, diritto alla casa, abitare sano e quindi a dimore di piccole dimensioni in cui sia garantita la salubrità degli ambienti interni. Si fa riferimento quindi a tecniche costruttive che prevedono l'utilizzo di materiali presenti in loco, che non necessitano di particolari strumenti per essere lavorati, utilizzati e messi in opera. Le tecniche costruttive rispondenti a queste caratteristiche sono quelle che utilizzano materiali come la terra cruda, la paglia, la pietra, il legno, i prodotti di origine animale. Un altro tema importante è quello dello urban design, ovvero una nuova sensibilità rispetto a come le città devono essere disegnate per far sì che siano a misura d'uomo e migliorino lo stile di vita dei propri abitanti.



(a) Una pompa solare



(b) Un piccola turbina eolica

Figura 1.4: Tecnologia appropriate per la produzione di energia



Figura 1.5: Una bicicletta con telaio in bamboo

1.1.5 Trasporti

Fra le tecnologie appropriate nell'ambito dei sistemi di trasporto c'è sicuramente la bicicletta, con quelle che poi possono essere le sue estremizzazioni come la bamboo bike (figura 1.5), che ha un telaio realizzato in bamboo. La bicicletta in generale è un mezzo di trasporto che permette di muoversi velocemente e di portare con se dei carichi ed ha un costo molto inferiore ai veicoli motorizzati.

1.1.6 Sanità

L'argomento sanità è certamente legato a quello dell'acqua e delle strutture igienico sanitarie. A prescindere dagli strumenti che si possano fornire, spesso sono fondamentali l'informazione e la formazione. Nelle aree rurali e nei PVS l'intervento da parte di un medico nell'immediato non è scontato. A volte sono necessarie ore, giorni, settimane. Per questo è importante che le persone siano innanzitutto capaci di capire cosa fare di fronte a certe patologie e a certe emergenze, e prendere



Figura 1.6: Macchina portatile per l'elettrocardiogramma prodotta da GE

provvedimenti in attesa di personale più specializzato. Fra le tecnologie appropriate troviamo allora le cure a base di erbe medicinali e prodotti naturali in genere, che sono nella disponibilità delle persone. Altri esempi possono essere le strumentazioni portatili e low-cost per eseguire analisi specialistiche come la macchina per l'elettrocardiogramma realizzata da GE Health Care per l'India (figura 1.6).

1.1.7 ICT

Nel campo dell'information and communications technology, site specific significa dare la possibilità a popolazioni in cui le infrastrutture sono carenti, di accedere comunque alla rete internet e ad altri servizi, e di avere una alfabetizzazione informatica. Soluzioni a questi problemi sono i netbook (figura 1.7), che rappresentano dispositivi low cost ma comunque in grado di interfacciarsi con reti a banda larga e periferiche di ogni genere. I telefoni cellulari, i telefoni satellitari e l'accesso ad internet tramite rete satellitare possono colmare le lacune infrastrutturali presenti sia in paesi in via di sviluppo che in quelli industrializzati.

1.1.8 Finanza

Per quanto possa sembrare un settore alieno a questo contesto anche la finanza è coinvolta nel tema. Servizi di microcredito per l'avvio di piccole attività possono essere considerati tecnologie appropriate. Oppure i sistemi economici chiusi che vengono instaurati in alcune zone particolarmente isolate e nelle quali gli abitanti scambiano attraverso il baratto i loro prodotti. Esempi di sistemi simili, ma semichiusi sono quelli dei circuiti Sardex e Scec rispettivamente in Sardegna e in Romagna. Anche i cosiddetti gruppi di acquisto, nei quali gruppi di persone si accordano per l'acquisto di grandi quantità di prodotti da agricoltori, allevatori e artigiani del posto, possono essere considerati site specific.



Figura 1.7: Il primo netbook prodotto da Asus



Figura 1.8: Le banconote utilizzate nel sistema arcipelago Scece



(a) Un essicatore solare



(b) Una cucina solare con sistema parabolico



(c) Il refrigeratore Zeer Pot

Figura 1.9: Tecnologie appropriate per l'alimentazione

1.1.9 Alimentazione

Uno dei bisogni essenziali dell'uomo è quello di acquisire energie attraverso l'alimentazione. La variabilità con la quale vi è disponibilità di certi cibi impone l'utilizzo di refrigeratori o essicatori per conservarli in condizioni di salubrità in un certo arco di tempo. Altro problema è quello della cottura dei cibi per consentire l'edibilità da parte degli esseri umani. Questi problemi sono evidentemente più difficili da superare in zone in cui le infrastrutture di erogazione dell'energia sono inesistenti. Esistono delle soluzioni, che possono essere a tutti gli effetti catalogate come tecnologie appropriate:

- gli essicatori solari (figura 1.9(a)), che attraverso delle camere a vetri e un sistema di aerazione permettono l'essiccamento dei cibi;
- le cucine solari (figura 1.9(b)), che con un sistema a specchi concentrano i raggi del sole su un punto in cui viene posizionato il cibo da cuocere;
- lo zeer pot (figura 1.9(c)), un sistema frigorifero che non necessita di energia elettrica, inventato da un insegnante nigeriano.

All'interno dell'insieme delle tecnologie *site specific*, come già visto in precedenza, sono presenti le costruzioni realizzate in terra cruda.

2.1 Storia

La terra cruda rappresenta il più antico materiale da costruzione utilizzato dall'uomo.

Tutte le grandi civiltà antiche, Assiri, Babilonesi, Persiani, Egizi, si servivano della terra cruda nei propri insediamenti. L'utilizzo non era limitato alle abitazioni, al contrario, la terra veniva usata anche per costruzioni a carattere pubblico e per i luoghi di culto.

I reperti più antichi testimoniano la presenza di costruzioni in terra cruda nella regione del Turkestan in un periodo stimato fra l'8000 e il 6000 a.C. Sono numerose in tutto il mondo le opere che nel tempo hanno visto la luce. La Grande Muraglia Cinese inizialmente era costituita esclusivamente da terra cruda e, solo successivamente, è stata rivestita in pietra e mattoni. Il tempio di Ramses II a Gurna (figura 2.1, risalente al 1200 a.C. è realizzato in mattoni di terra e i resti dimostrano che già allora c'era la capacità di realizzare delle strutture a volta. Dall'altra parte del globo, in Messico, la Piramide del Sole (figura 2.2 costruita dalla civiltà di Teotihuacan è in gran parte fatta di terra battuta. In Africa, e non solo, fin dalla costruzione delle prime moschee è stata usata la terra cruda.

Anche in nel nostro continente sono svariati i ritrovamenti che evidenziano l'utilizzo di questo materiale, in particolare nel nord Europa, in Francia e in Spagna. In Germania, nella fortezza di Heuneburg (figura 2.3), che rappresentava nel 600 a.C uno dei più importanti centri celtici per il commercio, i muri delle case erano realizzati con mattoni di terra: sono questi i ritrovamenti più antichi in Europa. Nel medioevo, in tutta l'Europa Centrale, la terra veniva usata come tamponamento per le strutture con telaio in legno o per coprire i tetti in paglia e rendere così gli edifici resistenti agli incendi. Sempre in quegli anni in Francia veniva utilizzata



Figura 2.1: Strutture a volta nel sito di Gourni



Figura 2.2: La Piramide del Sole in Messico



Figura 2.3: Abitazioni in terra cruda a Heuneburg

ampiamente la tecnica della terra battuta. Numerosi edifici che risalgono alla metà del 1700 sono tuttora integri ed abitati. E' proprio nella seconda metà del 1700 che gli studiosi Francois Cointeraux e David Gilly scrissero i primi manuali per diffondere questa tecnica costruttiva (chiamata *terre pisé*).

Nel 1800, a partire dalla seconda rivoluzione industriale, l'utilizzo della terra cruda nei Paesi più sviluppati subisce un arresto dovuto alla diffusione del cemento Portland e poi del calcestruzzo armato.

A partire dal 1970, grazie ad una crescente sensibilità verso temi quali la sostenibilità ambientale, economica e sociale, materiali come la terra cruda sono stati ripresi in considerazione, resi oggetto di nuovi studi e di innovazione, sia per quanto riguarda il materiale in sé, che per quanto riguarda le tecniche costruttive e i suoi possibili nuovi utilizzi. Architetti e ingegneri del calibro di Gernot Minke, Martin Rauch, Patrice Doat, François Vitoux sono riusciti a dare novità e lustro a questo materiale. Sono numerosi gli edifici, anche avveniristici e suggestivi, progettati e realizzati in terra cruda ricorrendo a tecniche tradizionali come il pisé (figura 2.4) o facendo entrare la terra in edifici ad alta intensità tecnologica (figura 2.5). Oggi



Figura 2.4: Abitazione progettata da Martin Rauch realizzata in Pisè

sono molte le associazioni, presenti in tante nazioni in ogni parte del mondo, che promuovono l'utilizzo della terra cruda, organizzano seminari per fare formazione a cittadini e aziende, incentivano il restauro e la ristrutturazione degli edifici esistenti, collaborano con le università per continuare a fare ricerca, innovare e far conoscere anche alle future generazioni di professionisti questo materiale. In Italia è presente l'Associazione Nazionale Città della Terra Cruda, con sede in Sardegna, nel comune di Samassi. In Europa è proprio la Sardegna la regione italiana in cui è presente il patrimonio più vasto di abitazioni esistenti in terra cruda, seguita da



Figura 2.5: Centro progettato da Martin Rauch con pannelli in terra cruda

regioni quali l’Abruzzo, le Marche e il Piemonte. In particolare, in Sardegna, le costruzioni sono molto diffuse nelle zone del Campidano, del Cixerri e del Sarrabus.

2.2 Composizione del materiale e caratteristiche

Con il termine terra cruda intendiamo un composto estratto dal suolo ad una profondità maggiore rispetto a quella che contraddistingue lo strato superficiale del terreno, in genere circa 30cm. Questo dettaglio sulla profondità alla quale andare a prendere il materiale è importante in quanto non devono essere presenti sostanze organiche putrescibili all’interno del composto.

Possiamo definire la terra cruda come un conglomerato costituito da elementi di diversa granulometria. Nello specifico abbiamo in percentuali variabili:

- la ghiaia, contraddistinta da dimensioni che variano da alcuni millimetri a pochi centimetri;
- la sabbia, con dimensioni che arrivano sino a circa 2 millimetri;
- il limo, con dimensioni comprese fra i 2-4 μm e 50-70 μm ;
- l’argilla, che ha granulometria inferiore a 2-4 μm .

Le caratteristiche del materiale possono essere rilevate attraverso un’analisi granulometrica, e con indagini sulla qualità dell’argilla, in particolare individuando la plasticità che la contraddistingue. Queste informazioni risultano fondamentali per

stabilire quale potrebbe essere la tecnica costruttiva da applicare con il materiale a disposizione, e quindi definire tipo e quantità di altri materiali eventualmente da aggiungere alla terra di base per formare il composto finale con cui si andrà a realizzare l'opera. In base alla composizione ed in base all'utilizzo che ne viene fatto, la terra cruda viene definita con nomi differenti che verranno elencati più avanti. Rimangono però fermi alcuni pregi ed alcune problematiche che caratterizzano il materiale se confrontato con i materiali da costruzione di tipo artificiale, prodotti dall'industria.

Per quanto riguarda i problemi caratteristici, il primo da prendere in considerazione è la non "standardizzabilità" della terra cruda. Come detto precedentemente le proporzioni dei vari elementi e la qualità dell'argilla rendono ogni composto di terra (conglomerato) diverso da un altro. Per ogni sito di estrazione della terra risulta quindi necessario fare una serie di analisi e di esami per stabilire poi come utilizzare il materiale.

Altro limite è la tendenza del materiale a contrarsi dovuta all'evaporazione dell'acqua presente nell'impasto di terra. Questo fenomeno sarà tanto più evidente quanto più necessario sarà 'bagnare' il composto con acqua per attivare le forze vincolanti dell'argilla e raggiungere un determinato grado di lavorabilità in base alla tecnica di costruzione scelta.

Infine, a differenza di altri materiali da costruzione artificiali, la terra cruda è sensibile all'acqua e questo può rappresentare un problema nel momento in cui i manufatti vengano aggrediti da forti piogge e gelate. E' necessario quindi usare degli accorgimenti per cercare di esporre il meno possibile l'opera a questi agenti atmosferici.

Come detto, se è vero che questo materiale richiede delle attenzioni particolari, certamente esiste anche tutta una serie di pregi impliciti.

Innanzitutto la terra cruda riesce a regolare l'umidità presente nell'aria, assorbendola quando aumenta e va oltre i valore ideali e rilasciandola quando invece l'aria nell'ambiente diventa troppo secca.

Altro pregio è la capacità di immagazzinare il calore, caratteristica molto importante soprattutto nelle regione con una elevata escursione termica giornaliera, che permette di regolare il clima all'interno dell'abitazione.

La terra messa in opera cruda è poi un materiale che permette di risparmiare energia e ridurre le emissioni di elementi dannosi per l'ambiente. L'energia necessaria per la realizzazione, il trasporto e la movimentazione del materiale sul sito richiede solo l'1% dell'energia necessaria invece per mattoni cotti o manufatti in calcestruzzo.

Un altro aspetto fondamentale dal punto di vista ambientale è la riusabilità della terra. Questa infatti può essere parte di un numero indefinito di cicli di vita ed inoltre può essere reintegrata nel terreno senza comportare alcun danno ambientale. La terra cruda insomma non può mai essere definita un rifiuto che danneggia l'ambiente.

Se assumiamo, come viene fatto in questo elaborato, che le costruzioni in terra cruda possano essere definite tecnologie site specific, un altro pregio è quello del risparmio in termini di costo dei materiali e del trasporto di questi ultimi, che possono essere reperiti in luoghi limitrofi al cantiere.

La terra cruda inoltre rappresenta il materiale ideale per l'auto-costruzione in quan-

to non sono necessari macchinari particolarmente costosi o difficili da reperire ed utilizzare, ed il processo di realizzazione è semplicemente ad alta intensità di lavoro umano.

Un aspetto importante dal punto di vista dell'igiene, della salubrità dell'ambiente interno e della conservazione dei materiali è la capacità della terra di evitare la comparsa di muffe o la proliferazioni di altri elementi organici patogeni grazie alla capacità, sopra menzionata, di assorbire l'umidità anche nei punti di contatto con altri materiali quale potrebbe essere il legno.

2.2.1 L'acqua e gli altri additivi per la formazione dell'impasto

Come detto in precedenza, in funzione del composto 'terra cruda' a disposizione si individuano una o più tecniche costruttive per cui il materiale risulta idoneo. In alcuni casi è possibile utilizzare il materiale "as is", senza l'aggiunta di nessun altro elemento. Nella maggior parte dei casi però è però indispensabile creare un impasto in cui l'elemento acqua è importante tanto quanto la terra. Il quantitativo d'acqua da inserire è variabile e risulta molto difficile definire un valore percentuale che possa andare bene. Questo dipende da diversi fattori, già accennati in precedenza. Innanzitutto la tecnica costruttiva determina quale deve essere il grado di lavorabilità dell'impasto. Potrebbe essere necessario un impasto liquido, più o meno plastico o appena modellabile. Stabilita la tipologia d'impasto necessaria alla tecnica costruttiva bisogna poi capire qual è la proporzione di argilla presente nella terra e qual è la sua qualità. Terre in cui le argille hanno un'elevata superficie specifica necessitano di un maggior quantitativo di acqua per avere una buona plasticità e viceversa. In generale aumentando la percentuale di acqua nell'impasto si passerà da uno stato solido, ad uno semi-solido, plastico ed infine liquido; questo avviene nel momento in cui le molecole di argilla non riusciranno più a contenere al loro interno l'acqua.

Oltre all'acqua, necessaria perlopiù per dare al materiale la lavorabilità utile alla particolare tecnica prescelta per costruire, possono essere inseriti nell'impasto degli additivi al fine di migliorare alcune caratteristiche del materiale. Negli anni l'uomo, prendendo atto dei limiti caratteristici della terra cruda, ha sperimentato l'aggiunta di altri elementi che, per non snaturare il materiale, devono necessariamente essere a basso costo e altrettanto rispettosi dell'ambiente. Non mancano però i casi di additivi artificiali e più o meno inquinanti rispetto ad altri. Un elemento utilizzato molto frequentemente è la sabbia. Questa viene inserita nel composto prevalentemente per abbassare la percentuale di argilla e quindi per ridurre il problema della contrazione del materiale durante l'evaporazione dell'acqua presente nell'impasto. Per andare nella stessa direzione si possono utilizzare anche soda, acido urico o acido tannico. Altri materiali naturali che si possono inserire nell'impasto per ridurre la contrazione del materiale sono le fibre quali: la paglia, i peli animali o dell'uomo, le fibre di cocco, l'agave, il bamboo e gli aghi di pino.

Per stabilizzare il materiale rendendolo più resistente all'erosione dell'acqua si possono utilizzare elementi artificiali come il cemento, la calce, il bitume, il silicato di sodio, delle resine sintetiche, le paraffine e lattice sintetico, oppure prodotti

naturali come l'urina, la caseina, il sangue, il letame, la colla animale, gli estratti di piante. E' possibile evitare l'aggiunta di elementi stabilizzanti riparando le pareti con sporgenze coperte da tegole e ponendo una barriera all'umidità di risalita dal terreno attraverso uno zoccolo, talvolta realizzato in pietrame o con mattoni cotti, posizionato sulle fondazioni e con uno strato di materiale impermeabile tra lo zoccolo e la muratura in terra.

Se si vuole invece incrementare la capacità termoisolante della terra cruda è possibile unire all'impasto materiali naturali spugnosi come la paglia, il sughero, le alghe o le canne, oppure materiali artificiali come l'argilla espansa, la perlite espansa, o della pomice, o anche altri materiali di scarto di altri processi quale ad esempio la segatura, la lana di pecora e quant'altro di similare.

2.3 Le tecniche costruttive

E' difficile stabilire quante realmente siano le tecniche per usare la terra cruda. Tante ne sono state sviluppate in diverse parti del mondo in relazione alle caratteristiche del materiale presente in loco ed anche alla possibilità di reperire altri materiali e strumenti necessari alla realizzazione dell'edificio. Gli studiosi Doat, Hays, Houben, Matuk e Vitoux nel loro manuale 'Costruire En Terre' ne hanno individuato tredici (figura 2.6), alcune si differenziano per lo stato in cui si trova l'impasto al momento dell'utilizzo, altre proprio per come viene realizzata l'abitazione.

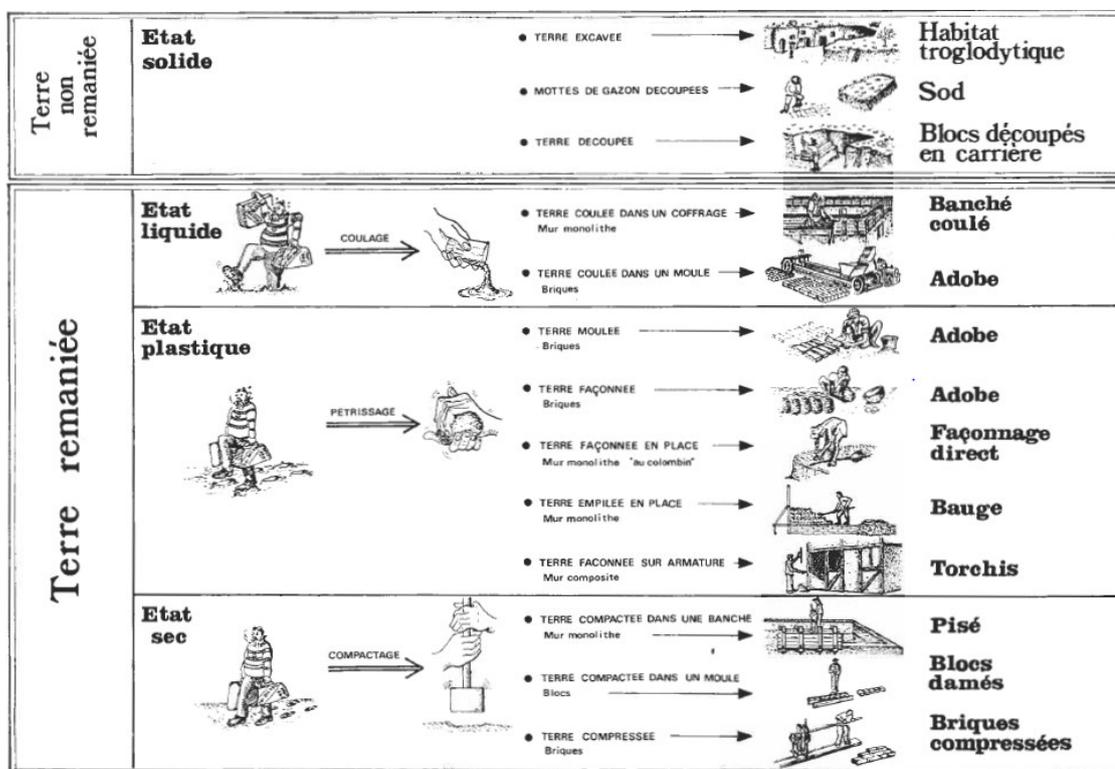


Figura 2.6: Tecniche di costruzione in terra cruda

Fra queste, certamente le sei tecniche più importanti sono: Adobe, Pisé, Torchis, Bauge, Blocchi compressi, Terra Paglia.

2.3.1 Adobe

Il nome Adobe deriva dal termine arabo al-tub che significa il mattone. La tecnica, diffusa in tutte le zone dal clima caldo-secco, subtropicale o mite, consiste nella realizzazione di mattoni attraverso uno stampo in cui viene gettato un impasto di terra e paglia con adeguato livello di plasticità (fig 2.7). Una volta formato il



Figura 2.7: Formazione dell'adobe nello stampo

mattone, lo stampo viene rimosso e si lascia essiccare il mattone all'aria aperta (fig. 2.8). Il periodo di essiccamento varia in base alle condizioni climatiche locali. Al termine di questo periodo i mattoni possono essere utilizzati semplicemente come i banali laterizi, usando per l'allettamento della malta di terra, o in alternativa della malta di calce (fig. 2.9). La dimensione dei mattoni non è standard ovunque, ma in generale rispetta la regola di buon senso per cui il mattone deve essere facilmente maneggiabile dall'artigiano con l'utilizzo di una sola mano. Il processo di realizzazione di questo tipo di mattoni in terra cruda può essere totalmente manuale o anche automatico. Gli Adobe possono essere utilizzati per costruire murature portanti, per creare cupole, tetti e forni. In quest'ultimo caso può essere necessario creare degli elementi cosiddetti speciali. Come detto in precedenza, la terra utilizzata deve essere priva di materiale organico per evitare degli attacchi biologici. Sempre per scongiurare questi ultimi è necessario, se si costruisce in



Figura 2.8: Mattoni in terra cruda durante l'essiccamento



Figura 2.9: Allettamento di muratura in adobe

Adobe, prestare molta attenzione durante l'allettamento, affinché non si creino involontariamente delle cavità che consentano la proliferazione di organismi. Per questo stesso motivo oltre che per assicurare una vita più lunga alla muratura è sempre utile applicare un intonaco. Grazie alle sue caratteristiche e alla sua semplicità d'uso l'Adobe è diffuso in tutto il mondo. In Italia le abitazioni costituite da adobe sono una peculiarità del sud della Sardegna e talvolta ricorrenti in alcune zone dell'Abruzzo e del Piemonte.



Figura 2.10: Vecchia abitazione in adobe presente in Sardegna

2.3.1.1 Caratteristiche tecniche, termiche e meccaniche dell'adobe

Prima di elencare le caratteristiche del mattone in terra cruda è opportuno analizzare più in dettaglio il processo di formazione del mattone e, più precisamente, la fase di essiccamento. Questa fase serve a far stabilizzare il mattone per poterlo successivamente utilizzare. Il periodo di essiccamento come abbiamo detto varia in base alle condizioni climatiche, ma certamente anche in base al quantitativo di acqua che si è scelto di inserire all'interno dell'impasto e quindi in base al grado di plasticità raggiunto. Al termine di questa fase l'acqua utilizzata per la creazione dell'impasto sarà evaporata completamente. A seguito di questo si ha un ritiro dimensionale che dipende dalle quantità di acqua, ghiaia, sabbia e paglia presenti nell'impasto. I valori di ritiro dimensionale sono comunque compresi generalmente nell'intervallo 0,5-2% [8].

Le caratteristiche prestazionali più importanti si trovano nella seguente tabella riassuntiva ¹:

¹I dati che compaiono in tabella sono stati presi da [8]

Caratteristica	Valore	Unità di misura
Porosità	15-40	%
Peso Specifico	1500-1900	kg/mc
Resistenza a Compressione	1-3	N/mm ²
Conducibilità Termica	0.8-0.9	W/m°C
Abbattimento Acustico	55	dB
Degrado da esposizione	<2	%

Guardando in particolare all'intervallo riguardante la conducibilità, ci si accorge che il mattone in terra cruda di per se non ha ottime doti di isolamento termico. Questo apparente difetto viene però superato dal fatto che in genere le murature in terra cruda hanno uno spessore più grande di quelle realizzate con altri materiali, ed è inoltre possibile abbassare questo valore facendo ricorso a particolari tessiture murarie. Per quanto riguarda la resistenza a compressione, questo parametro è influenzato in maniera importante dalla qualità del mattone e quindi dall'abilità di chi realizza il manufatto. Il mattone in terra cruda non offre prestazioni eccezionali e per questo è necessario che i muri portanti abbiano uno spessore minimo di 40cm, e che ci si limiti ad uno o due piani di elevazione, ma proprio in Sardegna sono presenti esempi storici a tre piani perfettamente conservati.

2.3.2 Pisé

Questa tecnica è diffusa principalmente in zone dal clima secco e viene utilizzata sia nei paesi in via di sviluppo che in quelli industrializzati. Consiste nel pressare la terra umida all'interno di casseformi, in strati di quindici centimetri per volta, fino a riempire un cassero alto circa trenta centimetri, e quindi con ricorsi successivi, ad arrivare all'altezza desiderata della muratura. Le casseformi sono in genere realizzate con dei pannelli di legno posti parallelamente ad una distanza pari allo spessore stesso della parete. I pannelli sono tenuti a distanza da speciali distanziatori. La realizzazione del muro viene fatto per gradi, spostando di volta in volta i pannelli (fig. 2.11) La battitura della terra posta all'interno delle casseforme viene fatta con appositi strumenti. Il processo può essere, anche in questo caso, realizzato manualmente o automatizzato. La *terre pisé* garantisce un ritiro ridotto del materiale rispetto ad altre tecniche, nonché un limitato utilizzo di acqua che rende questa tecnica più sostenibile dal punto di vista ambientale, perchè utilizzabile anche da popolazioni che hanno il problema dell'accesso a risorse idriche, e un ciclo di vita più lungo rispetto a tecniche come l'Adobe, dovuto al fatto che la muratura ottenuta con questa tecnica è monolitica (fig. 2.12) A differenza di un edificio in adobe, realizzare un edificio in pisé a differenza di un edificio in adobe richiede maggiori competenze specialistiche da parte degli operatori che prendono parte al cantiere. Questa tecnica ha preso piede soprattutto negli Stati Uniti e in Australia, dove i processi di innovazione stanno portando a nuove tecnologie che rendono più veloci le operazioni di messa in opera. In Italia il pisé è diffuso nel Piemonte, dove molte abitazioni sono ancora presenti ed abitate.



Figura 2.11: Realizzazione di una muratura in Pisè



Figura 2.12: Muratura in pisè

2.3.3 Torchis

Per la sua semplicità questa tecnica costruttiva in terra cruda è forse più antica. Utilizzata in zone climatiche dal clima mite a caldo-secco è anch'essa ampiamente diffusa nel mondo. La tecnica prevede la realizzazione di una sorta di rete costituita da canne, legno o altri materiali vegetali e non. Questa trama è connessa alla struttura portante e rappresenta le pareti dell'edificio. La rete viene ricoperta da un impasto in terra-paglia con plasticità tale da avere una buona presa ed essere sufficientemente modellabile (figura 2.13). E' molto importante avere un impasto



Figura 2.13: Messa in opera di una muratura eseguita con la tecnica Torchis

della giusta consistenza e creare uno strato abbastanza spesso, affinché la parete non sia soggetta ad un deterioramento precoce.

2.3.4 Mattoni in Terra Compressa

Tale tecnica prevede l'utilizzo di una terra leggermente umida, da comprimere dentro presse manuali o meccaniche che vadano a formare il mattone, riducendo il volume dell'impasto di terra di circa il 50%. All'impasto possono essere addizionati degli stabilizzanti come la calce o il cemento. I mattoni in output a questo processo hanno un aspetto simile ai mattoni in terra cotta e vanno utilizzati in maniera simile a questi (figura 2.15). La superficie del mattone risulta essere molto liscia e a causa di questo risulta anche difficile l'aggrappo dell'eventuale strato di intonaco, a meno dell'utilizzo di reti porta intonaco. Tuttavia risultano di aspetto gradevole, per cui



Figura 2.14: Una pressa per la realizzazione di mattoni in terra compressa



Figura 2.15: Mattoni in terra compressa in uscita dalla pressa

vengono spesso lasciati a vista, e le pareti sono meno deteriorabili rispetto a quelle realizzate con altre tecniche, nonostante l'esposizione diretta ad agenti atmosferici (figura 2.16). I processi di industrializzazione permettono la creazione di questi



Figura 2.16: Una parete realizzata in mattoni di terra compressa

mattoni con un processo a minor intensità di lavoro rispetto ad altre tecniche. La tecnica è recente rispetto alle altre e proprio per questo non esistono ancora dati attendibili sulla durata del ciclo di vita delle abitazioni costruite con mattoni in terra compressa.

2.3.5 Bauges

L'utilizzo che viene fatto di questo tipo di mattoni di terra è forse il più primitivo che si possa immaginare. Questa tecnica consiste infatti nel modellare l'impasto con apporti grossolani di materiale con cui si realizza una costruzione ancora umida. Il composto di terra e paglia viene posto in opera senza l'utilizzo di strumenti, guide, casseforme o altro. Ne consegue che la consistenza del materiale risulta essere il fattore più importante per la lavorazione. Questa tecnica è particolarmente diffusa nell'Africa Subsahariana e nello Yemen. I muri eretti con questo metodo sono in genere più spessi alla base e rastremati verso la cima. Possono anche essere pareti portanti e, come per quelle realizzate in Pisé, risultano poi monolitiche. Esistono due differenti i modi per assestare la terra durante la formazione della muratura. Si può adagiare la terra modellandola e formando degli strati dello spessore di 2-4cm (figura 2.17(a)), oppure si possono formare dei blocchi di impasto piriforme, da posizionare senza l'utilizzo di malta (figura 2.17(b)). Spesso su questi ultimi vengono eseguiti dei buchi conici con le dita, che serviranno poi ad aiutare

l'aggrappo dell'intonaco. In Italia, e più precisamente in Abruzzo, esistono delle



(a) Sovrapposizione di strati



(b) Allettamento sfere di terra

Figura 2.17: La tecnica Bauges

abitazioni realizzate con una tecnica, più sofisticata ma simile a questa, chiamata Massone (figura 2.18).



Figura 2.18: Costruzione in terra cruda tipica dell'Abruzzo

2.3.6 Terra-Paglia

La terra-paglia è una tecnica che alcuni datano all'indomani della seconda guerra mondiale in Germania. Per l'esecuzione della muratura vi è la necessità di utilizzare in opera dei casseri. L'impasto che viene gettato all'interno degli stessi è costituito da un cumulo di paglia completamente immerso in un composto piuttosto liquido di terra e acqua. Una volta che l'impasto si trova all'interno dei casseri, viene pressato e lasciato essiccare (figura 2.19(a)). Le pareti realizzate con questa tecnica non

possono essere utilizzate come struttura portante, al pari di quelle realizzate con la tecnica del Torchis. L'impasto terra-paglia viene anche definito "terra alleggerita", ovvero può essere ottenuta anche sostituendo alla paglia altri elementi quali le scaglie di legno, il sughero o, per citare un materiale artificiale l'argilla espansa.



(a) Messa in opera



(b) Particolare

Figura 2.19: Muratura in terra-paglia

Pabillonis - La Casa di Cultura delle Terre

3.1 Cenni di storia urbana

Pabillonis è un piccolo centro della Sardegna di circa tremila abitanti, situato a metà strada fra le città di Oristano e Cagliari, nella pianura del Campidano in Sardegna, a 42 m sul livello del mare.

Sono antiche le origini di questo piccolo paese. Resti in tre differenti siti dimostrano la presenza di insediamenti, anche piuttosto importanti sin dall'età nuragica. Il nome Pabillonis deriva dal termine 'padiglioni', in latino tardo *pavilio*, dovuto alla forma delle tende viste dall'alto, degli accampamenti militari di guardia stanziati a difesa dei confini all'epoca del Giudicato di Arborea.

Il paese, fin dal 1800 si è sempre distinto per le capacità dei propri artigiani nella lavorazione dell'argilla, di cui erano ricchi i terreni limitrofi. In particolare erano noti a tutti i produttori di tegole e di pentole di Pabillonis che, per questo, veniva soprannominato in lingua sarda *sa bidde de is pingiadas*, che in italiano significa 'il paese delle pentole'. L'economia di Pabillonis, oltre che per la lavorazione dell'argilla, si basava e si basa ancora oggi anche sull'agricoltura e sull'allevamento.

Grazie alle caratteristiche del territorio e dell'economia, le costruzioni in terra cruda fanno parte della tradizione del paese. Numerose sono quelle tutt'ora esistenti ed abitate, ma molte di più sono quelle che necessitano di importanti interventi di ristrutturazione. Tutte le abitazioni in terra cruda presenti a Pabillonis sono realizzate con la tecnica costruttiva dell'*adobe* che in Sardegna prende il nome di *làdiri*¹.

Con queste sue peculiarità, il Comune di Pabillonis nel 2006 entra a far parte dell'Associazione Nazionale Città della Terra Cruda e fa parte di una sottorete della

¹Per fonte diretta, mi ricorda in proposito l'arch. Alceo Vado che il nome "làdiri" viene direttamente dalla locuzione latina "lateres crudi", così sintetizzata dalla maestranze in Sardegna; ed è quindi precedente a quello oggi noto come "adobe", databile invece dopo il periodo spagnolo della "riconquista" dai mussulmani ovvero intorno al dodicesimo secolo. Diversi studiosi internazionali cominciano quindi a tenere nel debito conto la locuzione più antica di "làdiri".

medesima associazione, denominata ‘Le città della terra’.

3.2 La Casa di Cultura delle Terre

Lo stesso anno della sua adesione all’Associazione Nazionale Città della Terra Cruda, il Comune di Pabillonis, insieme agli altri sei enti partecipa ad un bando POR (Piano Operativo Regionale) 2000-2006 - denominato Civis - con il progetto pilota ‘Itinerari della Terra’. L’idea è quella di *“esaltare il potenziale di qualità della vita insito nell’universo della terra cruda, con il suo contenuto di salubrità, naturalità, legame con i valori locali e sostenibilità”*. E’ nell’ambito di questo bando e con l’intento appena evidenziato che il Comune di Pabillonis presenta il progetto di restauro e riordino di un edificio in terra cruda appositamente acquistato, la Casa di Virginia Matta. L’immobile, di proprietà della famiglia Matta da decenni, sembra fosse stato realizzato in principio per essere utilizzato come vaccheria, con annesso il dormitorio del fattore. Questa intuizione è supportata dal fatto che i Matta erano dei ricchi imprenditori agricoli già prima del 1800. L’abitazione, situata di fronte alla Chiesa parrocchiale, è stata poi adattata ad abitazione padronale. In allegato si può trovare l’inquadramento planimetrico del lotto, come studiato e presentato dall’architetto Alceo Vado, ideatore dell’intero programma urbano denominato *“Papilio terrae”*.

Al momento dell’acquisto da parte del comune, la Casa di Virginia Matta era una abitazione che versava in condizioni di degrado, oggetto di atti di vandalismo e strutturalmente pericolante. Nelle figure 3.1 e 3.2 si possono vedere alcune immagini delle condizioni iniziali della struttura. Dalle immagini si possono notare problemi quali la frattura di alcune parti di muratura, il distacco di molte parti di intonaco dovuto all’utilizzo di materiali industriali che poco si confanno alle murature in terra cruda, la situazione di degrado del pacchetto di copertura e della pavimentazione.

Gli interventi che si sono resi necessari sono numerosi e rilevanti, anche per la volontà dei progettisti di salvaguardare e valorizzare il più possibile l’esistente. Anche per questo gran parte delle lavorazioni sono state eseguite manualmente o con l’aiuto di mezzi meccanici rigorosamente di piccole dimensioni.

Attraverso l’intervento di restauro, il Comune di Pabillonis intende trasformare la proprietà in quella che è stata definita la **Casa di Cultura delle Terre** di cui si può vedere il concept nel progetto tecnico allegato.

Come si può vedere nelle immagini, il programma prevede che i vani presenti all’interno dell’abitazione siano adibiti a uffici, sale ed aule di un centro internazionale di documentazione mentre i padiglioni esterni saranno utilizzati per attività formative e di laboratorio. Tutto questo non esclude la possibilità di organizzare anche piccoli eventi a carattere culturale ed esposizioni.

Fra gli allegati è possibile vedere la planimetria catastale dell’abitazione. L’immobile è censito nel N.C.E.U. al foglio 23 mappale 4840 categoria B/4, classe U, consistenza 1945 mc. e rendita di € 2.209,92. La superficie del lotto è di 1053,00

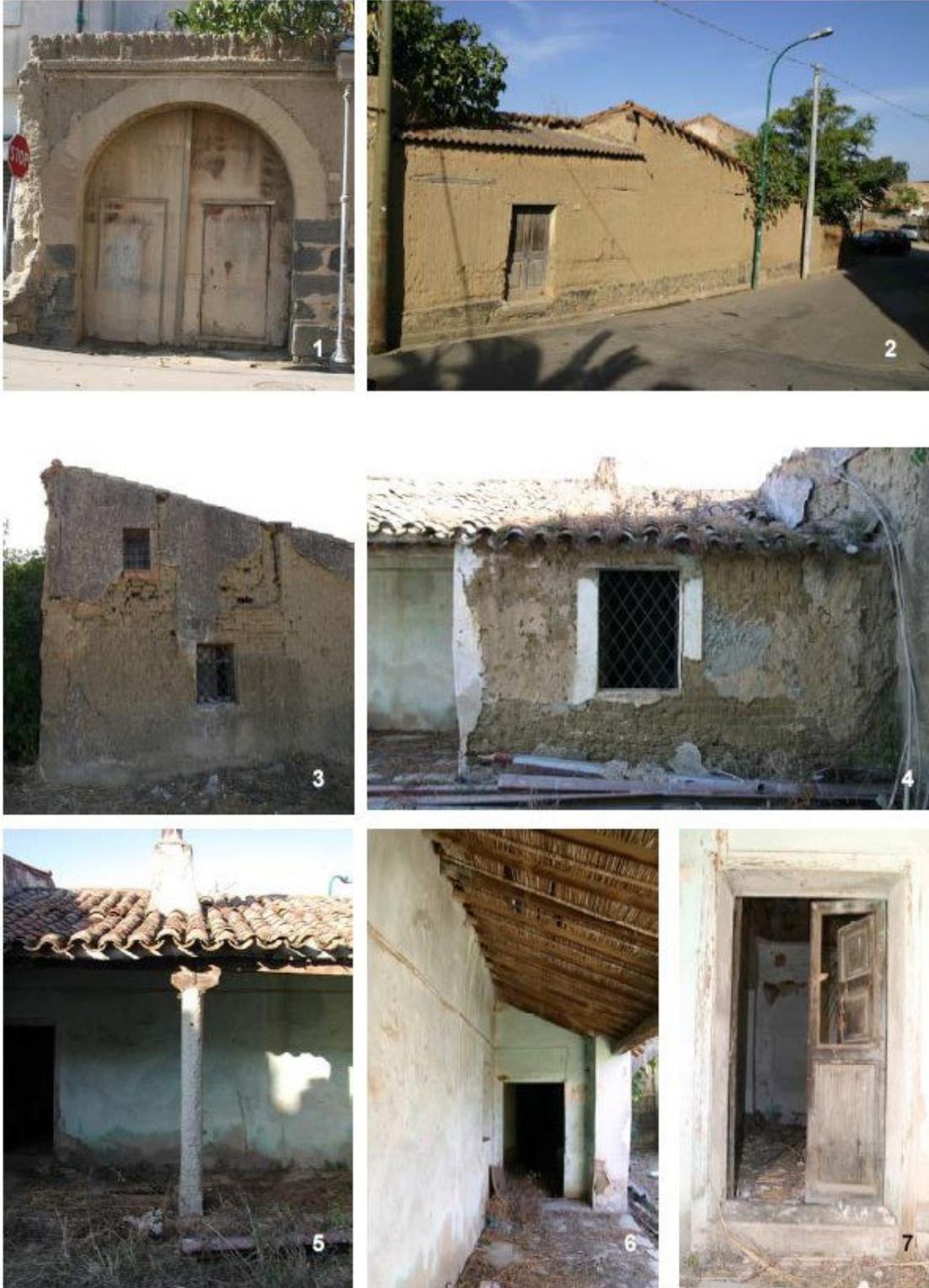


Figura 3.1: Lo stato dell'immobile al momento dell'acquisto - Esterni



Figura 3.2: Lo stato dell'immobile al momento dell'acquisto - Interni

mq, la superficie dell'abitazione al lordo delle murature è di 507,00 mq, mentre la superficie calpestabile è di 366,52 mq.

3.2.1 I dati raccolti

Durante un periodo di permanenza in Sardegna, è stato fatto il lavoro di raccolta dati. Questa fase è stata molto impegnativa e dispendiosa in termini di tempo, ma perfettamente in linea con quanto richiesto dalle prerogative di valutazione delle TSS (Tecnologie Site Specific), come ricordato nel capitolo 1. Raccogliere i dati ha significato individuare le persone che ne erano in possesso, prendere contatto con esse e riuscire a trovare tutte insieme le informazioni utili allo studio. La comunicazione spesso non è stata semplice per via dei diversi punti di vista e per la differente formazione di ognuno. In generale tutte le persone che sono state contattate hanno però dimostrato entusiasmo e grande disponibilità.

Inizialmente si è preso contatto con l'amministrazione comunale, ed in particolare con il vice-sindaco del Comune di Pabillonis, Riccardo Sanna. Grazie a lui è stato possibile avere i dati riguardanti il progetto fondativo e la gara d'appalto indetta dal Comune nel 2006. E' emerso inoltre che nel cantiere hanno operato in sequenza due diverse imprese edili: Ditta Edile Ubaldo Armandi, di Carbonia e l'impresa "Il Concio Costruzioni", di Villacidro. Tramite il responsabile dell'area tecnica del Comune di Pabillonis, Ing. Stefano Cadeddu, è stato possibile avere ulteriori dettagli sulle imprese. In particolare dai colloqui è scaturito che la ditta appartenente ad Ubaldo Armandi, la quale vinse la prima gara d'appalto ed eseguì buona parte dei lavori strutturali, non è più in essere e quindi risulta estremamente difficile la presa di contatto con i responsabili della stessa. E' stato per questo difficoltoso accedere ai dati riguardanti la prima tranches di lavori. I dati ricavati sono stati forniti dall'incaricato del tecnico locale di controllo del cantiere, Geom. Giancarlo Collu, il quale si è reso disponibile a fornire tutte le informazioni in suo possesso e i dettagli di cui era a conoscenza fra i quali: il computo metrico estimativo dei lavori eseguiti, alcune immagini dei lavori eseguiti, alcune immagini delle fasi di lavorazione, planimetrie dell'abitazione con relative quote e informazioni sull'accatastamento. Molto importanti i "quaderni di cantiere" elaborati tramite molti *disegni autografi* dall'arch. Alceo Vado. Quest'ultimo, per realizzare il programma urbano di cui abbiamo accennato ha coinvolto nel progetto un'apposita Associazione Temporanea di Professionisti. I particolari sui mattoni in terra cruda utilizzati dalla ditta Armandi sono stati forniti dalla stessa impresa produttrice, la Ditta Fratelli Coni di Ales. Il responsabile di quest'ultima ha messo a disposizione anche gli studi fatti sulla terra di produzione dei mattoni dal Dipartimento di Ingegneria Civile e dei Materiali dell'Università di Cagliari, la ricetta utilizzata per l'impasto dei mattoni e tutte le informazioni riguardanti la preparazione dell'impasto, gli strumenti necessari e i mezzi di trasporto usati per la consegna della merce sul sito della Casa di Cultura delle Terre. Sono stati messi a disposizione anche alcuni campioni di diversi elementi costruttivi. Per quanto riguarda la seconda parte dei lavori, eseguita dall'impresa Il Concio Costruzioni, il responsabile di quest'ultima, Geom. Emilio Podda, ha fornito dettagli sui prodotti utilizzati, le lavorazioni effettuate ed alcune stime su altre lavorazioni. L'Ing. Alessio Bellu, responsabile in questa seconda fase della direzione tecnica dei lavori, ha fornito la perizia di assestamento redatta

al termine dei lavori, da cui è stato possibile sapere degli interventi realizzati e quelli da realizzare. Tutte le informazioni riguardanti le ricette degli intonaci in terra e delle altre miscele utilizzate, comprese le specifiche sulle diverse tessiture murarie in cantiere e i tanti aspetti teorici riguardanti la terra cruda sono stati forniti dall'arch. Alceo Vado, senza la cui esperienza esaustiva di questa tecnologia l'intera realizzazione dell'opificio stesso non sarebbe stata fattibile. L'impossibilità di prendere contatto con la ditta Armandi e la momentanea chiusura del cantiere ha impedito infine la raccolta, in tempi ragionevoli e con un grado di approssimazione accettabile, dei dati analitici sui fatti e i momenti specifici strettamente legati alla costruzione nella sua globalità.

I dati più importanti, e comunque relativi alle azioni e opere fondamentali per l'edificio vengono riportati di seguito.

3.2.1.1 Opere di disfacimento

Per preparare il cantiere al restauro del preesistente ed al rifacimento delle parti non più recuperabili, perchè seriamente compromesse, sono state necessarie diverse opere. Si è dovuto procedere allo "scoticamento" del terreno vegetale per la successiva posa dei rilevati, alla realizzazione di scavi per eliminare eventuali opere di riempimento e drenaggio preesistenti e preparare poi l'area alla successiva sistemazione di tubazioni, pozzetti e fondazioni. Sono state smontate alcune murature esistenti, portanti e non, in terra cruda ma non più recuperabili al pari dei solai (fig). E' stato necessario il disfacimento del massetto di pavimentazione esistente



Figura 3.3: Vista di parte dell'edificio a seguito di alcuni crolli e demolizioni

sino ad una profondità di 8cm, la demolizione di molte parti di intonaco di qualsiasi specie e buona parte del manto di copertura in tegole. Si è provveduto poi alla rimozione degli infissi originali irrecuperabili e degli apparecchi igienico-sanitari,

dei controsoffitti interni posticci realizzati in masonite e delle strutture lignee dei tetti.

3.2.1.2 Le fondazioni

Trattandosi di un'opera di restauro, molta parte del sistema di fondazioni esistente è stato recuperato con interventi che andassero a rinforzare l'esistente. Alcune parti delle fondazioni però sono state rifatte, come è stata predisposta ex-novo tutta l'area dei box laboratori e il sottofondo necessario alla successiva pavimentazione. Questi nuovi interventi sono stati realizzati con l'impiego anche di calcestruzzi a diversa resistenza caratteristica. In figura 3.4 si può vedere il particolare costruttivo delle fondazioni, riferito a quelle preesistenti e al loro risanamento. La profondità

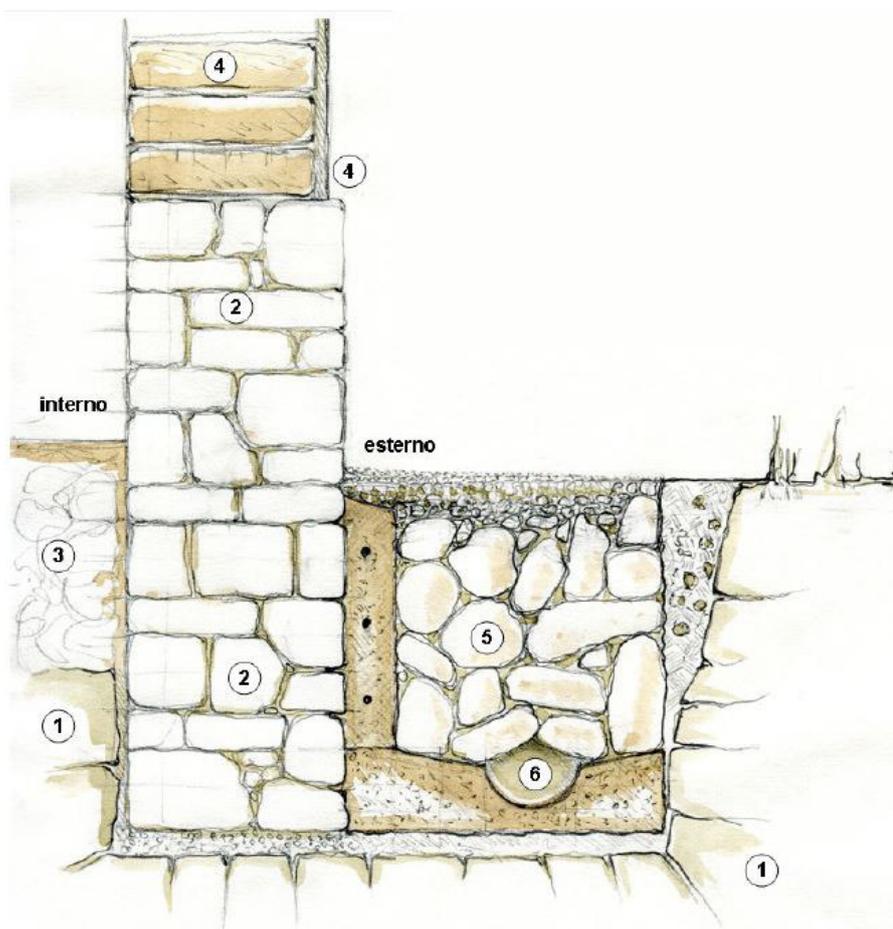


Figura 3.4: 1.sezione del terreno naturale; 2.apparato di fondazione e basamento in pietrame; 3.pacchetto pavimento; 4.muratura in adobe e particolare costruttivo tradizionale da risanare; 5.sistema di risanamento e drenaggio delle fondazioni esterne; 6.canale di scolo sotterraneo dell'acqua piovana e di infiltrazione laterale. - Disegno autografo dell'arch. Alceo Vado, appositamente autorizzato per questa pubblicazione

sino alla quale il pietrame delle fondazioni è affogato nel terreno è pari a 80cm ed ha uno spessore murario di 80cm. La base su cui poi poggia la muratura in

terra cruda e che rappresenta un prolungamento delle fondazioni stesse, utile ad evitare il fenomeno dell'umidità di risalita, ha un'altezza minima di 50cm dal piano di calpestio. Questa è in pietra in murature preesistenti recuperate, mentre è stata realizzata in laterizio nelle murature di nuova costruzione. Per quanto riguarda il drenaggio ventilato del vespaio interno sono riportate diverse tipologie realizzative in figura 3.5. Nel caso specifico è stato messo in opera il Tipo A2.

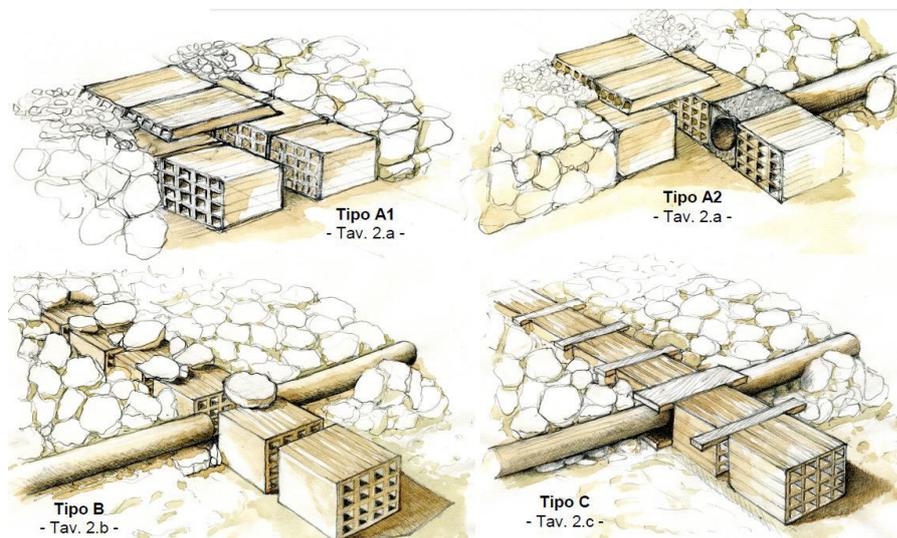


Figura 3.5: Scheda riassuntiva dei tipi di drenaggio ventilato per vespai interni - Disegno autografo dell'arch. Alceo Vado, appositamente autorizzato per questa pubblicazione

3.2.1.3 La muratura

Per quanto riguarda le murature esistenti, stabili ed in buone condizioni generali, sono state conservate ed hanno subito solo interventi di ripristino. In particolare è stata applicata la tecnica dello scuci-e-cuci. Come si può vedere in figura 3.6 si vanno a rimuovere gli elementi compromessi da lesioni e/o scuciture, e quindi ammalorati, e li si sostituisce poi con altri di nuova fattura. Per fornire poi un supporto regolare a parti di basamento in pietra di pareti irregolari presenti nei diversi vani, sono state realizzate delle fodere in mattoni laterizi in modo tale da poter essere utilizzate come piani d'appoggio. Oltre al ripristino dell'esistente sono stati realizzati anche 241,71 metri cubi di nuova muratura in terra cruda. I mattoni crudi necessari sono stati acquistati pronti in quanto le tempistiche a disposizione dal bando europeo non hanno permesso la realizzazione dei mattoni sul sito.

I mattoni L'impresa produttrice dei mattoni in terra cruda utilizzati nel cantiere è stata la ditta Fratelli Coni di Ales (OR), un Comune a 35km di distanza dal Comune di Pabillonis. La ditta utilizza per la produzione dei mattoni la terra ricavata a seguito della realizzazione del proprio impianto produttivo. Questa è stata analizzata da un gruppo di lavoro dell'Università di Cagliari che ha poi proposto alla ditta una ricetta dell'impasto per la formazione dei mattoni stessi.

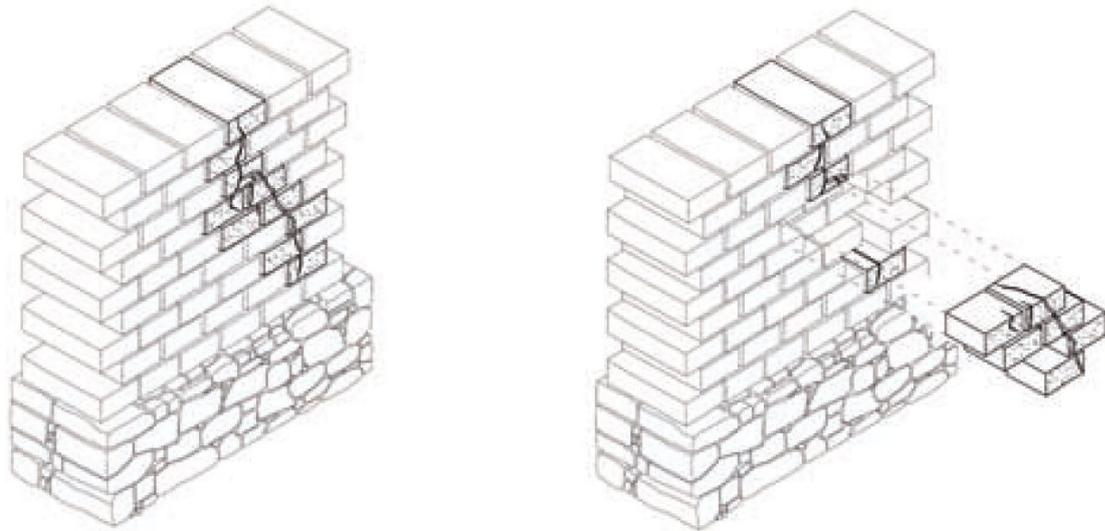


Figura 3.6: Schema della rimozione di elementi ammalorati da una muratura - Fonte [4]

I lādiri prodotti (=adobe), di cui si può vedere un esempio in figura 3.7, hanno dimensione 10x20x40 centimetri e un peso di circa 12,9 kg. La ricetta per la realizzazione di un singolo mattone è la seguente:

- 4,135 Kg di terra;
- 8,654 Kg di sabbia;
- 0,385 l di acqua;
- 0,169 Kg di paglia.

La sabbia è stata acquistata da terzi e arriva da un sito produttivo presente nel Comune di Simaxis (OR). La paglia arriva invece da un agricoltore locale. L'acqua utilizzata è quella di rete. Per la preparazione dell'impasto la ditta Fratelli Coni si serve di una molazza modello 200 prodotta da Officine Polieri² (figura 3.8). Questa macchina ha un motore trifase con potenza di 4HP e pesa in totale 1450kg. E' in grado di lavorare una quantità di impasto utile alla produzione di 52 mattoni. Per ottenere l'impasto pronto per la formatura del mattone, la molazza deve operare per 15 minuti. Per formare il mattone, Fratelli Coni utilizza degli stampi prodotti artigianalmente da una falegnameria del posto. Questi sono realizzati con legno di abete e lo spessore di ogni faccia è di 2,5cm. Lo stampo ha dimensioni leggermente più grandi del mattone in quanto è stato previsto il ritiro dimensionale che questo subisce durante la fase di essiccazione. Per quest'ultima fase i mattoni vengono lasciati per un periodo di circa 7 giorni all'aria aperta. Del trasporto dei mattoni al sito della *Casa di Cultura delle Terre* si è fatta carico la ditta Ubaldo Armandi, con un mezzo di trasporto di proprietà, e precisamente un Iveco Daily con cilindrata di 2500cc e 92 cavalli di potenza.

²Lo stabilimento di Officine Polieri si trova a Modugno(BA)

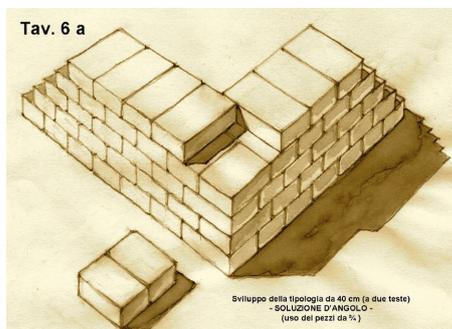


Figura 3.7: Il mattone in terra cruda realizzato dalla ditta Fratelli Coni

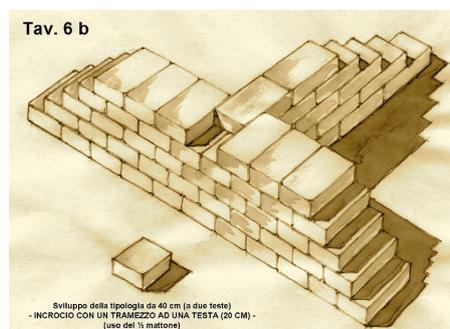


Figura 3.8: Molazza Officine Polieri modello 200

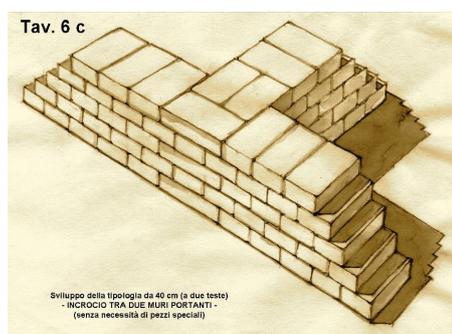
Le tessiture murarie Nel realizzare le murature sono state applicate due diverse tipologie di tessiture murarie. In allegato si trovano le piante con le distinzioni fra le due diverse tipologie realizzate. Per le pareti già esistenti che richiedevano un completamento è stata usata la tessitura che contraddistingueva queste pareti, ovvero la tessitura classica detta **a blocco** di cui si possono vedere gli schemi nelle figure 3.9(a), 3.9(b) e 3.9(c).



(a) Soluzione d'angolo



(b) Incrocio parete portante con tramezzo



(c) Incrocio tra due muri portanti

Figura 3.9: Particolari realizzativi della tessitura a blocco - Disegno autografo dell'arch. Alceo Vado, appositamente autorizzato per questa pubblicazione

Per le pareti di nuova realizzazione è stata invece realizzata una tessitura diversa, cosiddetta **a cassetta**. Nelle figure 3.10(a), 3.10(b), 3.10(c) e 3.10(d) è possibile vedere lo schema di questa tessitura e alcuni particolari riguardanti le soluzioni d'angolo, l'incrocio con altra parete e le parti terminali della parete.

Questa tessitura è stata preferita a quella a blocco per diversi motivi. Innanzitutto a parità di superficie di muratura permette un risparmio nel numero di mattoni. Per murature di spessore di 40 cm infatti, con la tessitura a blocco sono necessari circa 52 mattoni teorici (senza la malta) per metroquadrato di parete, mentre con la tessitura a cassetta sono sufficienti 27 mattoni. Altro aspetto è quello che deriva dalla formazione di un'intercapedine nella tessitura a cassetta. Questa intercapedine può essere sfruttata per ottenere un ulteriore vantaggio. Se questa intercapedine viene lasciata vuota si ottiene un maggiore isolamento acustico degli ambienti, se invece viene invece riempita con appositi impasti (figura 3.11) si raggiungono prestazioni migliori dal punto di vista dell'isolamento termico. Nell'edificio in oggetto sono state usate entrambe queste soluzioni. La muratura con tessitura a cassetta vuota è stata usata nelle pareti divisorie, a discapito del-

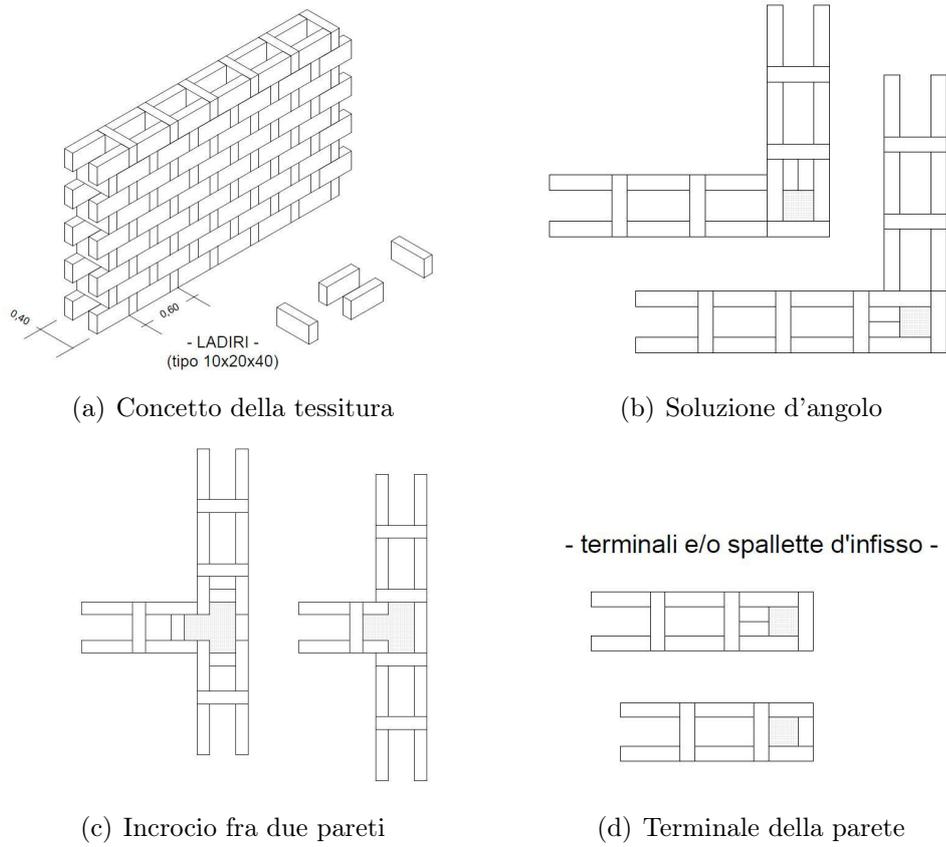


Figura 3.10: Particolari realizzativi della tessitura a cassetta

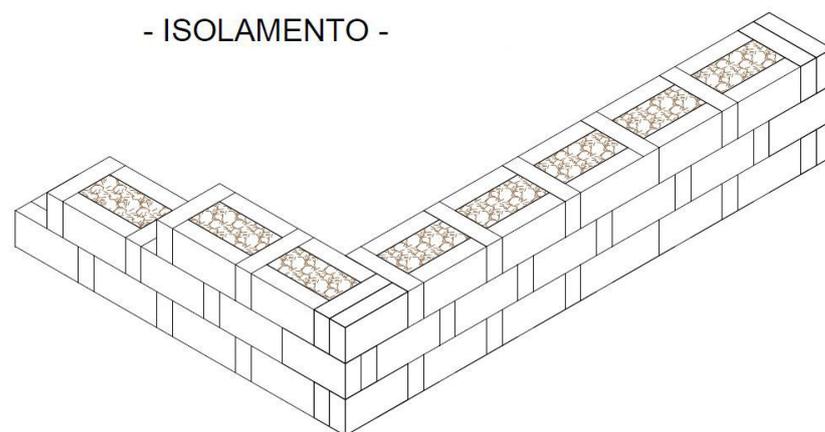


Figura 3.11: Schema della tessitura a cassetta con riempimento

lo spazio disponibile negli ambienti interni, quella piena è stata usata in tutte le nuove murature portanti. Il riempimento può essere realizzato con diversi impasti. Qualora si volesse seguire la filosofia site specific si può usare della terra alleggerita con paglia. Questa tecnica in genere non dà risultati eccellenti dal punto di vista dell'isolamento termico perché è molto difficile creare degli impasti che abbiano una densità inferiore ai $500\text{kg}/\text{mc}^3$. In questo caso però essendo il foro da riempire piuttosto piccolo si possono raggiungere addirittura i $300\text{kg}/\text{mc}$. Una alternativa, certamente più performante dal punto di vista termico, è quella di creare un impasto utilizzando degli elementi di origine minerale. Come visto nel capitolo 2 si possono creare mix di terra, acqua ed elementi come argilla espansa, perlite ed altri. Nella costruzione oggetto di questo studio è stata fatta una scelta pragmatica e data dalle necessità di cantiere. Per accelerare i tempi infatti è stato realizzato un impasto costituito da:

- 100 litri di perlite;
- 12,5 kg di cemento 325;
- 50 litri di argilla espansa;
- 30 litri di acqua.

Questo impasto, da realizzarsi in betoniera da 250 litri, occupa un volume pari a circa $0,096\text{ mc}$ ed è quindi sufficiente per riempire sei blocchi di dimensioni $20\times 20\times 40\text{ cm}$, ovvero da $0,016\text{ mc}$ cadauno. Se da un lato, un impasto di questo genere garantisce delle buone prestazioni di isolamento, certamente un impasto in terra-paglia risulta molto più economico (costerebbe il $62,57\%$ in meno), meno impattante dal punto di vista energetico rispetto agli altri materiali e più adatto all'autocostruzione.

Nella foto in figura 3.12(a), scattata a cantiere aperto si può notare nella parete a destra la tessitura a blocco di una parete preesistente, e a sinistra la tessitura a cassetta di una nuova parete. Nella foto in figura 3.12(b), scattata a cantiere chiuso, è raffigurata una parete con tessitura a cassetta che è stata lasciata con i mattoni a vista e in cui si può vedere anche il prolungamento delle fondazioni in mattoni pieni cotti prodotti da Fornace Brioni, su cui poggia la muratura in terra cruda.

In entrambe i casi, che si realizzi una muratura con tessitura a cassetta o a blocco, l'allettamento dei mattoni avviene con l'utilizzo di malta di terra. Non conoscendo le dosi precise dell'impasto utilizzato, nell'analisi di cui si parlerà nei capitoli successivi, si è considerato un impasto identico a quello dei mattoni. A prescindere dall'impasto e dalla tessitura, nei punti di contatto fra i mattoni è stato ipotizzato uno strato di malta di 2 cm di spessore.

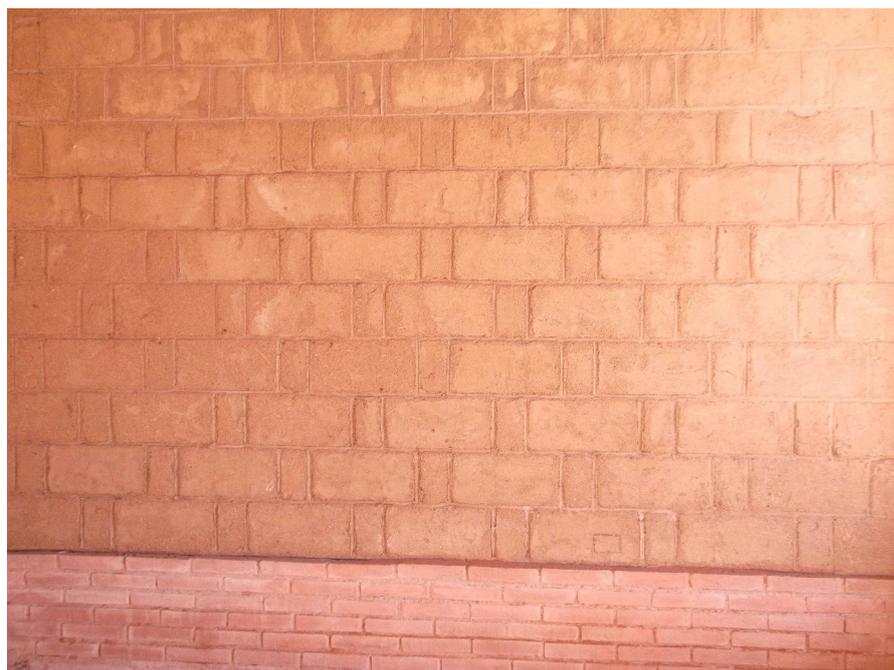
3.2.1.4 L'intonaco

Sulla maggior parte delle pareti interne all'abitazione e sulla esterna della nuova costruzione è stato applicato un intonaco in terra stabilizzata. Gli intonaci esterni,

³Si veda [7]



(a) Tessiture murarie a cassetta (sinistra) e a blocco (destra)



(b) Dettaglio della parete con tessitura a cassetta

Figura 3.12: Tessiture murarie



Figura 3.13: La vagliatura della terra utilizzata per gli intonaci

sono stati realizzati dalla ditta Ubaldo Armandi, mentre quelli interni dalla ditta Il Concio Costruzioni. La terra utilizzata per gli intonaci è stata ricavata dagli scavi realizzati in cantiere. Sulla base di questa terra l'arch. Vado ha messo a punto una ricetta, fornendo anche le indicazioni sulla modalità di realizzazione dell'intonaco. La ricetta per la produzione di 3mc di impasto è la seguente:

- 1,25mc di terra;
- 1,10mc di paglia di grano;
- 0,55mc di sabbia;
- 0,10mc di pura calce idraulica naturale Saint-Astier NHL 3.5 per gli intonaci esterni;
- 0,10mc di pura calce idraulica naturale Saint-Astier NHL 1.5 per gli intonaci interni.

La paglia utilizzata è stata fornita da un agricoltore locale, mentre la sabbia è stata acquistata in una rivendita locale di materiali per l'edilizia. La terra, come detto, si trovava già in cantiere ed è stata sottoposta a vagliatura attraverso vagli realizzati artigianalmente sul posto (figura 3.13) Per creare l'impasto è stata utilizzata una betoniera da 350 litri e 2HP di potenza, nella quale sono stati inseriti gli ingredienti e una quantità di acqua tale da far diventare l'impasto della stessa consistenza della famosa crema alla nocciola "Nutella". Per ottenere l'impasto pronto all'uso la betoniera deve essere messa in funzione per circa sette minuti. La realizzazione del rivestimento della parete richiede diverse fasi:

1. preparazione del supporto murario mediante applicazione di latte di calce applicata con nebulizzatore agricolo fino ad assorbimento;

2. applicazione di un primo strato di malta utilizzando la cazzuola con tecnica a schiaffo;
3. applicazione di un secondo strato di malta mediante cazzuola americana (figura 3.14(a));
4. lavorazione della finitura da eseguirsi con latte di calce e superficie trattata con frattazzo fino (figura 3.14(b)).

Lo spessore finale dell'intonaco deve essere di circa tre cm e il risultato della parete intonaca lo si può vedere nella fotografia di figura 3.14(c).

3.2.1.5 Il tetto ventilato

La copertura nelle abitazioni di terra cruda è un elemento fondamentale in quanto deve essere scongiurata la penetrazione di acqua e/o la formazione di umidità. Ma ancora più importante è assicurare un buon isolamento dall'insolazione al pari delle pareti. Per quest'ultimo motivo, in linea generale le alternative sono due: realizzare anche il tetto con la stessa terra cruda (es. volte o cupole), oppure costruire un tetto ventilato utilizzando come materiale principale il legno, i cui incastri murari ben si sposano con la parete portante di terra cruda. In questo caso l'alternativa scelta è stata quella del tetto ventilato in quanto in Sardegna non sono mai state utilizzate le coperture in terra cruda, ovvero è stata fatta una scelta che rimane in linea con lo stile storicamente adottato nel territorio. In figura 3.15 è possibile vedere la teoria funzionale del tetto ventilato. Nel prospetto sezione A-A in allegato è invece possibile vedere la sezione della copertura con tutti gli elementi che la compongono.

3.2.1.6 Gli infissi

Gli infissi originali, ormai deteriorati ed inutilizzabili, sono stati rimossi e sostituiti con altri identici per forma, colore e finiture, realizzati artigianalmente in legno. Le Ditte che a turno hanno operato nel cantiere si sono rivolte a due differenti falegnamerie artigianali. Nello specifico sappiamo che la ditta Il Concio Costruzioni ha commissionato la produzione degli infissi all'impresa Vivere il Legno, con sede nel comune di Villacidro. In figura 3.16 è raffigurato il nuovo portone d'ingresso. Nella tavola allegata "Abaco degli infissi" in allegato è possibile vedere gli schemi progettuali di tutti i nuovi infissi.

3.2.1.7 Gli archi e il pergolato

Nella parte esterna dell'immobile, davanti ai box laboratorio è stato realizzato un loggiato come motivo architettonico tipico delle tradizionali abitazione a corte del Campidano. Per gli archi sono stati utilizzati esclusivamente mattoni in terra cruda, mentre gli stipiti hanno un rinforso con mattoni pieni cotti, anche questo stile architettonico è tratto dalla tradizione. In figura 3.17 è possibile vedere la struttura degli archi. Davanti al loggiato è stato infine realizzato un pergolato in legno, come si può vedere in figura 3.18.



(a) Malta applicata con l'americana



(b) Malta applicata col frattazzo



(c) Stato finale della parete intonacata ed asciugata

Figura 3.14: L'applicazione dell'intonaco in terra stabilizzata

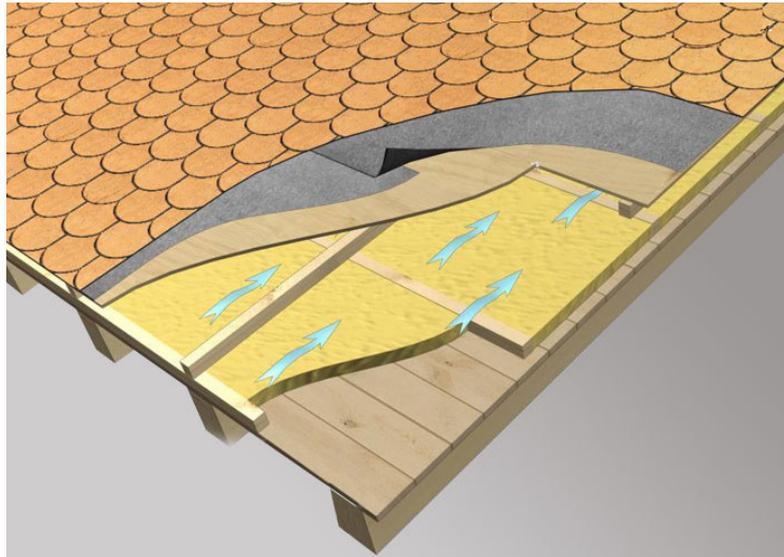


Figura 3.15: La struttura del tetto ventilato



Figura 3.16: Il portone dell'ingresso principale



Figura 3.17: Sequenza di archi a tutto sesto in terra cruda, realizzati nell'edificio



Figura 3.18: Il pergolato

L'analisi ambientale con il metodo LCA



Il Metodo dell'analisi del ciclo di vita (LCA) di un prodotto, di un processo o di un servizio consiste nel misurare le emissioni in aria, acqua e suolo e le sostanze naturali (minerali, combustibili fossili, acqua, legno, occupazione del suolo, energia di sole e vento) attribuite al ciclo di vita (produzione, uso e fine vita) dell'oggetto di studio e nel caratterizzarle secondo categorie di impatto (per esempio il riscaldamento globale, l'acidificazione, l'eutrofizzazione, la produzione di ozono oppure i diversi tipi di malattie dell'uomo, l'ecotossicità dell'ecosistema, l'uso del territorio che condiziona la biodiversità, il consumo dei minerali, il consumo di combustibili fossili o il consumo di energia non rinnovabile). Ogni categoria di impatto viene misurata con la sua unità di misura. Le categorie di danno vengono successivamente attribuite con pesi diversi alle categorie di danno (la salute dell'uomo, la qualità dell'ecosistema, l'uso delle risorse, la capacità dell'ecosistema di produrre i suoi frutti). Nel passaggio dalle categorie di impatto alle categorie di danno le unità di misura possono cambiare o rimanere le stesse. Le categorie di danno vengono

poi normalizzate per eliminare le unità di misura e pesate con una stessa unità di misura per ottenere un danno complessivo dell'oggetto di studio.

4.1 Le caratteristiche principali dei metodi

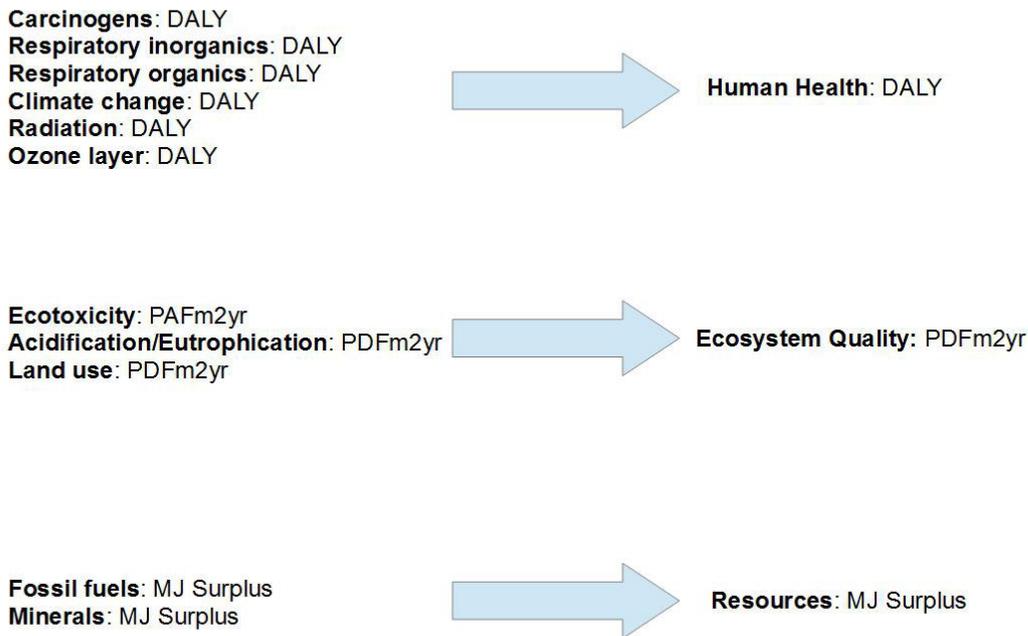
4.1.1 Eco-indicator 99

Eco-indicator 99 (Olanda) attribuisce un peso elevato al **land use**, non considera l'uso dell'acqua (inserito dal gruppo di studio), categorie di impatto e di danno misurate come "end point" (unità di emissione equivalente). L'emissione dei composti del carbonio con effetto serra è considerata solo relativamente alla salute dell'uomo (**Climate change**) e tiene conto della CO₂ assorbita (Carbon dioxide, in air assunta con fattore di caratterizzazione negativo) e delle emissioni biogeniche (CO, CO₂ e CH₄) e di Carbon dioxide, land transformation). Nella valutazione il gruppo di studio ha assunto un fattore di valutazione uguale per le tre categorie di danno. Le categorie di impatto hanno le stesse unità di misura delle categorie di danno (end point) esclusa Ecotoxicity che misura il danno in PAFm2yr ¹.

Le categorie di danno hanno le seguenti unità di misura:

- **Human Health:** il DALY che misura gli anni di vita persi dall'intera comunità europea a causa di 1 kg dell'emissione considerata;
- **Ecosystem Quality:** PDFm2yr che misura la percentuale delle specie vegetali europee danneggiate a causa di 1 kg dell'emissione considerata (Potential Disappeared Fraction), moltiplicata per l'area dell'Europa (m²) e per il numero di anni di permanenza dell'emissione (yr);
- **Resources:** MJ Surplus che misura l'energia in più necessaria per estrarre 1 kg della risorsa considerata quando la richiesta sarà 5 volte quella del 1990;
- il danno totale è espresso in punti (Pt).

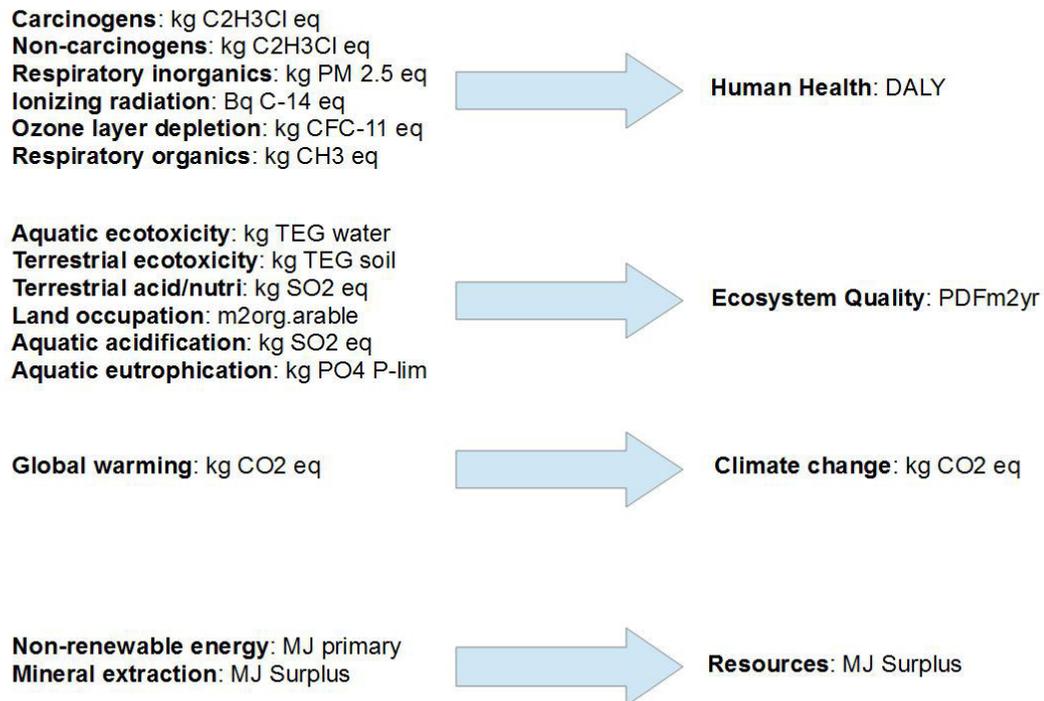
¹PAFm2yr che misura la percentuale delle specie vegetali europee danneggiate (influenzate) a causa di 1 kg dell'emissione considerata (Potential Affected Fraction)



Con la caratterizzazione vengono caratterizzate (moltiplicate per il fattore di caratterizzazione) le sostanze e inserite nelle singole categorie di impatto. Le categorie di impatto vengono poi caratterizzate (moltiplicate per il fattore di damage assessment) e inserite nelle categorie di danno a cui appartengono (damage assessment). La categoria di impatto così caratterizzata viene normalizzata dividendola per un fattore di normalizzazione che è il danno nella stessa categoria dovuto alle attività umane in Europa in 1 anno e riferito al singolo cittadino europeo. La categoria di danno (e quindi quella di impatto) così normalizzata, viene valutata (moltiplicata per il fattore di valutazione) che vale 333.333 per tutte le categorie di danno. Il danno totale è espresso in punti (Pt).

4.1.2 IMPACT 2002

IMPACT 2002 (Svizzera) non considera l'acqua e la trasformazione del territorio, (inserite entrambe dal gruppo di studio), le categorie di impatto sono misurate come "end point" (unità di emissione equivalente) e le categorie di danno sono misurate come "mid point" (effetti sull'ecosistema, sulla salute dell'uomo e sull'esaurimento delle risorse). L'emissione dei composti del carbonio con effetto serra è considerata solo nel **Global warming** (impact category) e quindi in **Climate change** (damage category) senza tenere conto della CO₂ assorbita e delle emissioni biogeniche. Nella valutazione del danno il metodo attribuisce un fattore di valutazione uguale a 1 per le quattro categorie di danno. Le categorie di impatto hanno come unità di misura le quantità di sostanza equivalente (mid point) Le categorie di danno (esclusa **Climate Change** che è ancora misurata con le quantità di sostanza equivalente) hanno come unità di misura l'effetto del danno sull'uomo, sulla qualità dell'ecosistema e sulle risorse (end point).

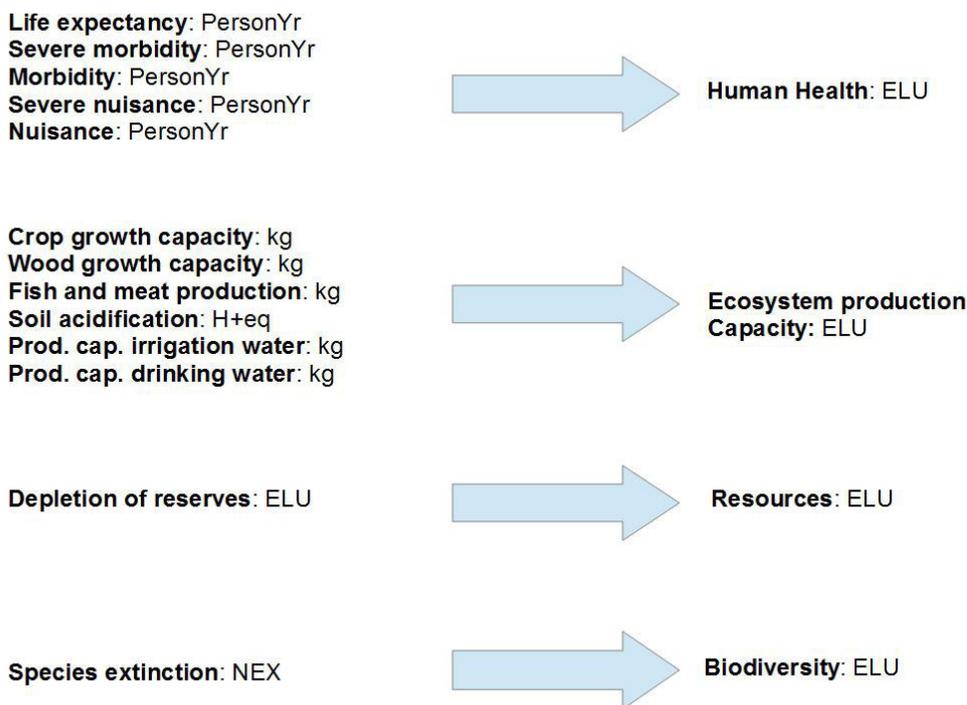


Con la caratterizzazione vengono caratterizzate (moltiplicate per il fattore di caratterizzazione) le sostanze e inserite nelle singole categorie di impatto. Le categorie di impatto vengono poi caratterizzate (moltiplicate per il fattore di damage assessment) e inserite nelle categorie di danno a cui appartengono (damage assessment). La categoria di impatto così caratterizzata viene normalizzata dividendola per un fattore di normalizzazione che è il danno nella stessa categoria dovuto alle attività umane in Europa in 1 anno e riferito al singolo cittadino europeo. La categoria di danno (e quindi quella di impatto) così normalizzata, viene valutata (moltiplicata per il fattore di valutazione) che vale 1 per tutte le categorie. Il danno totale è espresso in punti (Pt).

4.1.3 Il metodo EPS 2000

EPS 2000 (Svezia) considera il danno relativo all'uso dell'acqua e alla produzione di cereali, di legno e di carne e pesce con una categoria di danno che indica la capacità di produzione dell'ecosistema. Inoltre considera il danno sulla salute dell'uomo, sulla biodiversità e sull'esaurimento delle risorse. L'emissione di CO₂ è considerata nella salute dell'uomo e negli effetti sull'ecosistema tenendo conto delle emissioni biogeniche e della CO₂ assorbita (considerata come negativa e quindi vantaggiosa per l'ambiente): per quest'ultimo motivo nelle produzioni agricole si ottengono dei vantaggi. Non considera le radiazioni ionizzanti, attribuisce un peso elevato all'uso delle risorse. La caratterizzazione delle categorie di impatto è fatta sulla base dei costi esterni (willingness to pay) e ha come unità di misura l'equivalente ambientale dell'euro. La valutazione è uguale a 1 per tutte le categorie di danno. Il gruppo di lavoro ha ridotto la valutazione del danno dovuto alla capacità di produzione

dell'ecosistema perché è molto elevato quello dell'acqua. Le categorie di impatto suddivise per categorie di danno hanno le seguenti unità di misura (end point): **Human Health**: il PersonYr che misura gli anni di vita persi dall'intera comunità mondiale a causa di 1 kg di emissione considerata. **Ecosystem Production Capacity**: kg che per tutte le categorie di impatto (esclusa **Soil acidification** che misura il danno in ioni H+eq) misura la quantità di sostanza prodotta o non prodotta a causa di 1 kg di emissione considerata). **Depletion of reserves**: ELU (Environmental Load Unit) che è il costo esterno necessario per sopperire al danno dovuto all'esaurimento di 1 kg di risorsa considerata. **Species extinction**: NEX che misura il rapporto tra le specie animali e vegetali mondiali influenzate da 1 kg di emissione considerata e le specie totali influenzate in 1 anno nel mondo. Le categorie di danno sono espresse in ELU che è il costo esterno necessario per sopperire al danno prodotto da 1 kg di emissione considerata.



Con la caratterizzazione vengono caratterizzate (moltiplicate per il fattore di caratterizzazione) le sostanze e inserite nelle singole categorie di impatto. Le categorie di impatto vengono poi caratterizzate (moltiplicate per il fattore di damage assessment) e inserite nelle categorie di danno a cui appartengono (damage assessment). La categoria di impatto così caratterizzata viene valutata (moltiplicata per il fattore di valutazione) che vale 1 per tutte le categorie di danno esclusa Ecosystem production Capacity per cui vale 0.1. Il danno totale è espresso in punti (Pt).

4.1.4 Il metodo EDIP 2003

EDIP 2003 (Danimarca) non considera l'uso dell'acqua, le emissioni delle polveri e l'uso del territorio. Contiene solo categorie di impatto, misurate come unità di emissione equivalente, come volumi di aria, acqua e suolo inquinati. Il metodo considera anche la quantità di rifiuti prodotti. Attribuisce uno scarso peso dell'uso delle risorse, perciò è stato modificato dal gruppo di studio. Tiene conto delle emissioni biogeniche ma non della CO₂ assorbita. Ad eccezione dell'uso delle risorse, valuta il danno in base alla riduzione del danno stesso che la comunità nel futuro si prefigge di ottenere. Il metodo considera solo le categorie di impatto che hanno come unità di misura le quantità di sostanze equivalenti, le aree e i volumi danneggiati dalle emissioni e i pesi dei rifiuti. Le categorie di impatto sono:

Global warming 100a: kg CO₂ eq

Ozone depletion: kg CFC11 eq

Ozone formation (Vegetation): m².ppm.h

Ozone formation (Human): person.ppm.h

Acidification: m²

Terrestrial eutrophication: m²

Aquatic eutrophication EP(N): kg N

Aquatic eutrophication EP(P): kg P

Human toxicity air: m³

Human toxicity water: m³

Human toxicity soil: m³

Ecotoxicity water chronic: m³

Ecotoxicity water acute: m³

Ecotoxicity soil chronic: m³

Hazardous waste

Slag/ashes: kg

Bulk waste: kg

Radioactive waste: kg

Resources: kg

Con la caratterizzazione vengono caratterizzate (moltiplicate per il fattore di caratterizzazione) le sostanze e inserite nelle singole categorie di impatto. Le categorie di impatto vengono poi caratterizzate (moltiplicate per il fattore di damage assessment) e inserite nelle categorie di danno a cui appartengono (damage assessment). La categoria di impatto così caratterizzata viene normalizzata dividendola per un fattore di normalizzazione che è il danno per persona nel 1990 (nel mondo per le due categorie globali, in Danimarca per le categorie locali) nella stessa categoria e per **Resources** è il consumo per persona nel 1990. Le categorie di impatto così normalizzate, vengono infine valutate (moltiplicate per un fattore di valutazione che è dato dal rapporto tra il danno per persona nel 1990 e il danno per persona che si vuole ottenere nel futuro). Per **Resources** il fattore di valutazione è il rapporto tra il consumo per persona nel 1990 e il consumo per persona nel futuro. Il danno totale è espresso in punti (Pt).

4.1.5 Il metodo IPCC 100a 2007

IPCC GWP 100a 2007 calcola il danno dell'effetto serra. E' stato inserita dal gruppo di studio la Carbon dioxide, land transformation. Per il suo calcolo considera per l'anidride carbonica, il metano e il monossido di carbonio, sia le emissioni fossili che quelle biogeniche (ciclo breve del C). Inoltre considera l'anidride carbonica assorbita dalla vegetazione (che contribuisce negativamente all'effetto serra). La sola categoria di impatto considerata è Global warming 100a.

4.1.6 Confronto tra i metodi IMPACT 2002, EDIP e IPCC per il calcolo della CO₂eq

Il Metodo IPCC è quello a cui dovrebbe fare riferimento la normativa europea che indica le sostanze che devono essere usate per il calcolo della CO₂eq. Tale metodo considera le sostanze indicate dall'EPA (USA). In particolare considera tre orizzonti temporali: 20anni, 100anni e 500anni. L'effetto serra tende a diminuire col tempo, perché molte sostanze scompaiono. Alcune sostanze possono aumentare il loro effetto da 20 a 100 anni. Per il confronto scegliamo l'orizzonte temporale di 100anni. Il Metodo IPCC non considera il *Carbon monoxide* e considera la *Carbon dioxide, biogenic* (con fattore 1), il *Methane, biogenic* (con fattore 7.6 per 500°, 25 per 100a e 7.6 per 500a) e *Carbon dioxide, in air* (con fattore -1). Tale metodo considera, quindi, come dannosa la CO₂ che viene ceduta, anche se proveniente da biomassa. Il Metano biogenico, invece, è una emissione che non riporta l'equilibrio della CO₂ assorbita dalle piante e, quindi, è corretto considerarlo. Il Metodo IMPACT considera *Carbon monoxide fossil* e non considera la *Carbon dioxide, biogenic*, il *Methane, biogenic* e *Carbon dioxide, in air*. I coefficienti usati per il *Methane fossil* e per il *Dinitrogen monoxide* lascia pensare che l'orizzonte temporale sia di 500anni. Il Metodo IMPACT non considera la CO₂ che fa parte del ciclo breve del carbonio, perché esso dovrebbe completarsi in un periodo sufficientemente grande (il carbonio che viene assorbito dall'atmosfera viene reso con la vita e il fine vita delle piante e degli animali). Il Metodo EDIP 2003 si riferisce all'orizzonte temporale di 100anni, considera la *Carbon monoxide fossil*, la *Carbon dioxide, biogenic*, il *Methane, biogenic* e non considera la *Carbon dioxide, in air*. I coefficienti usati per il *Methane fossil* (23 anziché 25) e per il *Dinitrogen monoxide* (296 anziché 298) differiscono di poco dai valori indicati da IPCC 100a (25 per il primo e 296 per il secondo).

4.1.7 La scelta di un metodo

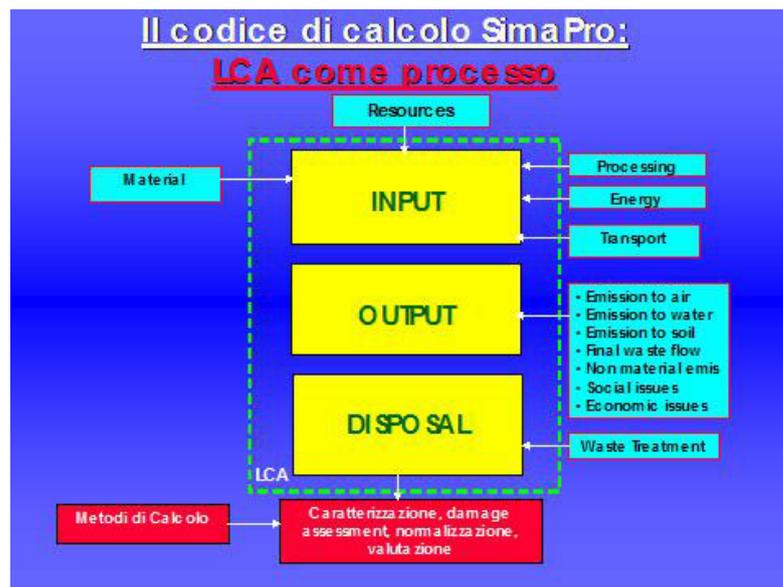
Per la presentazione dei risultati principali spesso si è scelto di usare il metodo IMPACT modificato dal gruppo di studio perché:

- misura le categorie di impatto secondo le quantità di emissioni equivalenti che rappresenta il criterio più comunemente accettato dalla comunità scientifica perché più sicuramente misurabile;
- misura le categorie di danno secondo gli effetti che esse producono sull'uomo (anni di vita persi), sull'ambiente (numero di specie vegetali influenzate), sul-

la disponibilità delle risorse (energia non rinnovabile consumata). Tali effetti sono difficilmente misurabili ma facilmente comprensibili dalla comunità;

- contiene tutti le più importanti categorie di impatto;
- i pesi dati alle emissioni e alle categorie di impatto riducono il danno dovuto all'uso del territorio di Eco-indicator 99 anche se fanno emergere quello della ecotossicità terrestre, specialmente se dovuta ai metalli pesanti (come emerge anche dal presente studio);
- nel calcolo dell'effetto serra o riscaldamento globale non considera né la CO₂ assorbita dalla vegetazione né i composti CO₂, CH₄ e CO biogenici, cioè che partecipano al 'ciclo breve' del carbonio;
- calcola il consumo di energia da combustibili non rinnovabili (fossili e uranio) che rimane uno degli indicatori più efficaci per valutare il danno ambientale di un prodotto;
- per il calcolo degli effetti delle emissioni considera come bacino l'Europa.

4.2 Il Codice di Calcolo



L'LCA del ciclo di vita di un mattone in terra cruda

5.1 Obiettivo dello studio e campo di applicazione

5.1.1 Obiettivo dello studio

Obiettivo dello studio è la valutazione del danno dovuto al ciclo di vita di un mattone in terra cruda

5.1.2 Campo di applicazione

5.1.2.1 Unità funzionale

L'unità funzionale è un mattone in terra cruda di dimensioni 10x20x40cm con una durata di vita indefinibile.

5.1.2.2 La funzione del sistema

La funzione del mattone è quella di permettere la creazione di una struttura verticale portante per edifici, resistente ad un carico di due solai.

5.1.2.3 I confini del sistema

I confini del sistema vanno dalla raccolta delle materie prime fino al fine vita dei componenti, passando attraverso l'uso stesso del mattone. Come uso si considera una durata di vita di 100 anni ipotizzando per questo periodo l'emissione di particolato. Per il fine vita si suppone che il mattone, dopo la macinazione, venga usato come riempimento di una cava d'argilla.

5.1.2.4 La qualità dei dati

I dati sono primari per quanto riguarda la produzione del mattone. Per l'estrazione delle materie prime che costituiscono il mattone (argilla, sabbia, paglia) e le

attrezzature necessarie a realizzarlo, come la molazza e lo stampo. Per l'energia elettrica e per i trasporti sono stati usati i processi di banca dati Ecoinvent. Per la produzione delle attrezzature vengono costruiti processi ad hoc. Per il calcolo viene usato il codice SimaPro 7.3.3. Per la valutazione del danno viene usato il Metodo IMPACT 2002+ modificato durante studi precedenti.

5.2 Inventario

Per analizzare il ciclo di vita di un adobe abbiamo tenuto in considerazione tutti gli aspetti che riguardano il mattone, partendo dall'estrazione delle materie prime necessarie sino ai processi di trattamento del rifiuto una volta arrivati al fine vita del mattone. Per fare questo abbiamo creato i seguenti processi:

1. Produzione mattoni in terra cruda;
2. Uso del mattone in terra cruda;
3. Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U).

Questi processi sono stati a loro volta utilizzati nel processo Ciclo di vita di un mattone di terra cruda.

Il processo Produzione mattoni in terra cruda descrive tutti gli aspetti che riguardano le attività necessarie alla produzione dei mattoni, ovvero l'occupazione di terra dovuta all'impianto produttivo, l'estrazione ed i trasporti delle materie prime, i trasporti delle attrezzature necessarie alla produzione sino all'impianto produttivo, l'utilizzo di queste attrezzature e le emissioni dovute alla manipolazione dei materiali durante la produzione dei mattoni.

Il processo Uso del mattone in terra cruda riporta al suo interno i dati sulla vita utile del mattone, partendo dal termine del processo di produzione del mattone, passando per il suo utilizzo come elemento costruttivo, sino ad arrivare al termine della sua vita utile. Vengono quindi presi in considerazione il trasporto dei mattoni dal sito di produzione, al cantiere edile in cui si costruisce l'abitazione ¹, l'occupazione di terreno dovuta ad un singolo mattone nell'ambito di una costruzione ² e le emissioni di particolato che, nel tempo di vita utile dell'abitazione, vengono rilasciate dal mattone in aria ed in acqua.

Il processo Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U) è stato appunto creato a partire dal processo Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U presente nel database. Il processo modificato considera, oltre a tutte le operazioni di trattamento del rifiuto previste per i normali mattoni, il ripristino di una cava d'argilla attraverso i materiali risultanti dal trattamento del rifiuto mattone in terra cruda.

¹E' stato considerato un trasporto su una distanza di 35km, pari alla distanza fra il Comune di Ales, dove sono stati prodotti i mattoni, e il Comune di Pabillonis, dove è stata realizzato l'intervento preso come caso studio in questo lavoro.

²Supponiamo che il mattone venga usato per costruire le murature portanti di una casa di area 8*8m e altezza 6m. La muratura perimetrale ha un'area che vale: 8*6*4m. La muratura interna che consideriamo anch'essa portante ha un'area che vale: 8*6*2m. Numero totale mattoni: (8*6*4+8*6*2)m*39mattoni/m. Durata di vita della casa: 100anni.

5.2.1 Produzione mattoni in terra cruda

5.2.1.1 Le materie prime

Per la produzione dei mattoni, come abbiamo visto nel capitolo 3, sono state utilizzate come materie prime la terra (assunta come argilla), la sabbia, la paglia di grano e l'acqua. Per ognuna di queste è stata trovata una corrispondenza fra i materiali presenti nel database, come riportato in tabella 6.7. Nella tabella 5.1 è riportata una descrizione generale del processo Produzione dei mattoni in terra cruda, mentre nelle tabelle 5.3 - 5.7 sono riportati i processi richiamati per descrivere le risorse, gli strumenti, i trasporti, l'energia e le emissioni.

Nome	Unità funzionale	Note
Produzione mattoni in terra cruda	n = 52 pezzi	Produzione di 52 mattoni in terra cruda Volume del mattone dopo l'essiccazione: $20 \cdot 40 \cdot 10 = 8000 \text{ cm}^3$ Supponiamo che il 100% dell'acqua aggiunta evapori Il peso del mattone vale: densità dell'argilla: 2.1 kg/dm^3 Vargilla: $4.135/2.1$ densità della sabbia: 1.5 kg/dm^3 Vsabbia: $8.654/1.5$ $P_{ms} = P_{mu} - 0.385$ $P_{mu} = 4.135 + 8.654 + 0.169 + 0.385 \text{ kg}$ $P_{ms} = 4.135 + 8.654 + 0.169 = 12.958 \text{ kg}$ Pmu: Peso mattone umido Pms: Peso mattone secco Densità del mattone crudo: $12.958/8 = 1.6198 \text{ kg/cm}^3$

Tabella 5.1: Produzione dei mattoni in terra cruda

Materiali	Note
Clay, at mine/CH $4,135 \cdot n \cdot 1,001 \text{ kg}$	Terra: si assume che la terra sia argilla, $4,135 \text{ kg/mattone}$
Sand, at mine/CH $8,654 \cdot n \cdot 1,001 \text{ kg}$	Sabbia: $8,654 \text{ kg/mattone}$
Straw IP, at farm/CH $0,169 \cdot n \cdot 1,001 \text{ kg}$	Paglia - si assume una coltivazione intensive production: 0.169 k/mattone
Tap water, at user/RER $0,385 \cdot n \cdot 1,001 \text{ kg}$	Acqua: 0.385 l/mattone

Tabella 5.2: Materiali del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

Si fa notare, che in sintesi operativa per rappresentare il materiale terra è stato utilizzato il materiale Clay, at mine/CH. In realtà questa opzione di laboratorio è una scelta peggiorativa del processo in termini ambientali rispetto a quanto accaduto realmente per due motivi. Per prima cosa la terra utilizzata dalla ditta Fratelli Coni per produrre i mattoni non è costituita al 100% da argilla, infatti, come spiegato nel capitolo 2, l'argilla è solo uno dei diversi elementi che costituiscono la terra. In secondo luogo l'argilla non è stata estratta da una apposita cava, ma è una terra recuperata dagli scavi eseguiti al momento della realizzazione dell'impianto produttivo della medesima ditta.

Risorsa	Note
Occupation, industrial area $(290+800)*50/(7000*0,5*50)*52$ m2a	Area dell'azienda che produce i mattoni crudi: 290m2 piazze: 800m2 Tempo di vita: 50 anni Produzione: 7000*6mesi all'anno
Transformation, to industrial area $(290+800)/(7000*0,5*50)*52$ m2	

Tabella 5.3: Inputs from nature del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

Strumento	Note
Molazza200 $1/30000*15/60$ p	Molazza 200 Peso della molazza: 1450kg Tempo di vita: 30000h Durata della lavorazione: 15min L'allocazione della Molazza200 considera solo la quotaparte della sua vita utile necessaria per la produzione dei 52 mattoni
Stampo2.5 $1/5000*n$ p	Stampo Tempo di vita: 5000 mattoni Peso dello stampo: 3.33kg

Tabella 5.4: Strumenti del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

Trasporto	Note
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 1450*1/30000*15/60*256 kgkm	Trasporto della Molazza200 dal sito di produzione di Officine Polieri a Modugno (BA) al porto di Napoli per il successivo trasporto via mare alla Sardegna: 256km La quota parte di kgkm che viene allocata a questo processo è quella che corrisponde alla sola produzione dei 52 mattoni
Transport, barge/RER U 1450*1/30000*15/60*498 kgkm	Trasporto della Molazza200 via mare da Napoli a Cagliari: 498km
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 1450*1/30000*15/60*72,9 kgkm	Trasporto della Molazza200 su strada da Cagliari al sito di produzione della ditta Fratelli Coni ad Ales (OR): 72.9 km
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 3,33*1/5000*n*5 kgkm	Trasporto dello stampo dalla falegnameria artigiana al sito di produzione della ditta Fratelli Coni, entrambe situate ad Ales(OR): 5km
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 1450*1/30000*15/60*72,9 kgkm	Trasporto della Molazza200 su strada da Cagliari al sito di produzione della ditta Fratelli Coni ad Ales (OR): 72.9 km
Transport, van <3.5t/RER U 8,654*n*1,001*32,8 kgkm	Trasporto della sabbia dall'azienda produttrice a Simaxis (OR) al sito di produzione della ditta Fratelli Coni, ad Ales(OR): 32,8 km

Tabella 5.5: Trasporti del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

Energia	Note
Electricity, low voltage, at grid/IT U 4*0,745699872*15/60 kWh	Rappresenta la quota parte di energia elettrica necessaria alla Molazza200 per lavorare l'impasto corrispondente a 52 mattoni Potenza della Molazza200: 4 HP 1!h=0.745699872 kilowatts

Tabella 5.6: Energia del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

Emissioni	Note
Particulates, < 2.5 µm 12,958*n*0,0007/3 kg	Si è supposto che durante la manipolazione si disperda nell'ambiente, in aria, lo 0.07% in peso dei materiali utilizzati per la produzione di 52 mattoni (n=52) sotto forma di particolato in parti uguali nelle tre diverse tipologie
Particulates, > 2.5 µm, and < 10 µm 12,958*n*0,0007/3 kg	
Particulates, > 10 µm 12,958*n*0,0007/3 kg	

Tabella 5.7: Emissioni del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

5.2.1.2 Le attrezzature

La molazza Nella tabella 5.8 è riportata una descrizione generale del processo Molazza200, mentre nelle tabelle 5.9 - 5.12 sono riportati i processi richiamati per descrivere i materiali, e lavorazioni, i trasporti e il trattamento dei rifiuti.

Nome	Unità funzionale	Note
Molazza 200	1 p	Officina Polieri, modello 200 Peso della molazza modello 200: 1450kg Il valore del peso è stato parametrizzato attraverso il parametro peso. Si è supposto che la molazza sia costituita approssimativamente da: 90% in peso da acciaio 5% in peso da rame 5% in peso da gomma usata per gli pneumatici Tempo di vita: 30000h Potenza: 4 HP L'impianto produttivo di Officine Polieri si trova a Modugno (BA)

Tabella 5.8: Molazza200

Materiali	Note
Chromium steel 18/8, at plant/RER U peso*0,9 kg	Il peso dell'acciaio, come da ipotesi, rappresenta il 90% del peso totale della molazza
Copper, primary, at refinery/GLO U peso*0,05 kg	Il peso del rame, come da ipotesi, rappresenta il 5% del peso totale della molazza
Synthetic rubber, at plant/RER U peso*0,05 kg	Il peso della gomma, come da ipotesi, rappresenta il 5% del peso totale della molazza

Tabella 5.9: Materiali del processo Molazza200

Lavorazioni	Note
Section bar rolling, steel/RER U peso*0,9 kg	Lavorazione dell'acciaio
Wire drawing, copper/RER U peso*0,05 kg	Estrusione del rame
Blow moulding/RER U peso*0,05 kg	Stampaggio della gomma

Tabella 5.10: Lavorazioni del processo Molazza200

Trasporto	Note
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U peso*100 kgkm	Trasporto dei materiali necessari alla realizzazione della molazza dal sito di produzione degli stessi, all'impianto produttivo di Officine Polieri a Modugno (BA). Distanza stimata: 100 km

Tabella 5.11: Trasporti del processo Molazza200

Waste treatment	Note
Recycling steel and iron/RER U (con raccolta) peso*0.9 kg	Fine vita ipotizzato per l'acciaio (i processi di waste treatment sono stati creati ad hoc)
Recycling copper/RER U (con raccolta) peso*0.05 kg	Fine vita ipotizzato per il rame
Recycling rubber and leather/RER U (con raccolta) peso*0.05 kg	Fine vita ipotizzato per la gomma

Tabella 5.12: Trattamento del rifiuto del processo Molazza200

Lo stampo Nella tabella 5.13 è riportata una descrizione generale del processo Stampo2.5, mentre nelle tabelle 5.14 - 5.16 sono riportati i processi richiamati per descrivere i materiali, i trasporti e il trattamento dei rifiuti.

Nome	Unità funzionale	Note
Stampo2.5	1 p	<p>Stampo per la formatura del mattone</p> <p>Tipo di legno: legno di abete</p> <p>Densità ipotizzata del legno: 550kg/m³</p> <p>Il peso dello stampo è stato ricavato calcolando il volume di legno impiegato e moltiplicandolo per il valore di densità ipotizzato</p> <p>Peso: 3,33kg</p> <p>Si suppone che per produrre lo stampo venga impiegata una quantità di legno pari al 30% in più</p> <p>Tempo di vita: 5000 formature</p>

Tabella 5.13: Stampo2.5

Materiali	Note
<p>Sawn timber, Scandinavian softwood, planed, air dried, at plant/RER U</p> $((10/(1-0,0125)+2,5)*(20/(1-0,0125)+5)*(40/(1-0,0125)+5)-(10*20*40)/(1-0,0125))*1,3$ <p>cm³</p>	<p>Il processo <u>Sawn timber, Scandinavian softwood, planed, air dried, at plant/RER U</u> è stato creato integrando il processo <u>Sawn timber, softwood, planed, air dried, at plant/RER U</u> considerando come legno lavorato lo Scandinavian softwood il cui processo è maggiormente dettagliato all'interno del database Ecoinvent</p> <p>Dimensioni mattone: 10x20x40 cm</p> <p>Si considera un ritiro dallo 0.5 al 2%=1.25%</p> <p>Spessore cassa: 2.5cm</p> $V_{interno}=(10x20x40)/(1-0.0125)$ $V_{esterno}=(10/(1-0.0125)+2.5)*(20/(1-0.0125)+5)*(40/(1-0.0125)+5)$

Tabella 5.14: Materiali del processo Stampo2.5

Trasporto	Note
Transport, van <3.5t/RER U 3,33*1,3*50 kgkm	Trasporto del legno dal sito di produzione del legno al sito di produzione della falegnameria ad Ales (OR). Distanza stimata: 50 km

Tabella 5.15: Trasporti del processo Stampo2.5

Trattamento rifiuti	Note
Riciclo legno (da Medium density fibreboard, at plant/RER U) multioutput $((10/(1-0,0125)+2,5)*(20/(1-0,0125)+5)*(40/(1-0,0125)+5)-(10*20*40)/(1-0,0125))$ cm ³	Riciclo dello stampo
Riciclo legno (da Medium density fibreboard, at plant/RER U) multioutput $((10/(1-0,0125)+2,5)*(20/(1-0,0125)+5)*(40/(1-0,0125)+5)-(10*20*40)/(1-0,0125))*0,30$ cm ³	Riciclo dello scarto di lavorazione dovuto alla produzione dello stampo che abbiamo supposto essere pari a 30% del legno necessario

Tabella 5.16: Trattamento del rifiuto del processo Stampo2.5

5.2.2 Uso del mattone in terra cruda

Nella tabella 5.17 è riportata una descrizione generale del processo Uso del mattone in terra cruda, mentre nelle tabelle 5.18 - 5.20 sono riportati i processi richiamati per descrivere le risorse, i trasporti e le emissioni.

Nome	Unità funzionale	Note
Uso del mattone in terra cruda	1 p	<p>Nell'ipotesi che il mattone non venga rivestito, si suppone che durante la sua vita si disperda lo 0.1% della massa per il 50% sotto forma di particolato in aria e per il 50% sotto forma di particolato in acqua</p> <p>Il mattone è quello prodotto dalla ditta Fratelli Coni di Ales (OR)</p> <p>Le dimensioni del mattone sono: 10x20x40cm</p> <p>Il volume del mattone è: 0.008m³</p> <p>Il peso del mattone a secco vale: 12.958kg</p> <p>Il mattone viene utilizzato nel cantiere di Pabillonis (VS)</p>

Tabella 5.17: Uso del mattone in terra cruda

Risorsa	Note
Occupation, urban, discontinuously built $8*8*100/((8*6*4+8*6*2)*39)*1$ m2a	<p>Si è supposto che il mattone venga usato per costruire le murature portanti di una casa di area 8*8m e altezza 6m.</p> <p>La muratura perimetrale ha un'area che vale: $8*6*4m^2$</p> <p>La muratura interna che consideriamo anch'essa portante ha un'area che vale: $8*6*2m^2$</p> <p>Il numero di mattoni necessari per la realizzazione di un m2 di parete, considerato anche il volume di malta necessario, è pari a: 39 mattoni</p> <p>Numero totale mattoni: $(8*6*4+8*6*2)*39$</p> <p>Durata di vita della casa: 100anni</p> <p>Come si può notare, è stata allocata a questo processo l'occupazione di suolo relativa ad un singolo mattone.</p>

Tabella 5.18: Inputs from nature del processo Uso del mattone in terra cruda

Trasporto	Note
Transport, van <3.5t/RER U $12,958*35$ kgkm	<p>Trasporto del mattone dal sito dell'impresa produttrice, ditta Fratelli Coni, ad Ales(OR), al sito del cantiere presente nel comune di Pabillonis (VS): 35km</p>

Tabella 5.19: Trasporti del processo Uso del mattone in terra cruda

Emissioni in aria	Note
Particulates, < 2.5 µm 12,958*0,001*0,5/3 kg	Nell'ipotesi che il mattone non venga rivestito, si suppone che durante la sua vita si disperda lo 0.1% della massa per il 50% sotto forma di particolato in aria, in parti uguali nelle tre tipologie dimensionali standard
Particulates, > 2.5 µm, and < 10 µm 12,958*0,001*0,5/3 kg	
Particulates, > 10 µm 12,958*0,001*0,5/3 kg	
Emissioni in acqua	Note
Particulates, < 10 µm 12,958*0,001*0,5/2 kg	Nell'ipotesi che il mattone non venga rivestito, si suppone che durante la sua vita si disperda lo 0.1% della massa per il 50% sotto forma di particolato in acqua, in parti uguali nelle due tipologie dimensionali standard
Particulates, > 10 µm 12,958*0,001*0,5/2 kg	

Tabella 5.20: Emissioni del processo Uso del mattone in terra cruda

5.2.3 Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)

Nella tabella 5.21 è riportata una descrizione generale del processo Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U), mentre nelle tabelle 5.22 - 5.24 sono riportati tutti gli aspetti ad esso legati.

Nome	Unità funzionale	Note
Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)	1 kg	Nell'ipotesi che per eseguire il riciclo del mattone in terra cruda siano necessario considerare gli stessi input e le stesse emissioni del processo di riciclo di un mattone in laterizio, è stato utilizzato lo stesso identico processo di riciclo andando però ad apportare delle modifiche per quanto riguarda il trattamento del rifiuto. Per il mattone rifiuto ottenuto dal mattone di terra cruda è stato previsto il Recupero di una cava di argilla

Tabella 5.21: Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)

Waste treatment	Note
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U 0 kg	Questo tipo di trattamento era quello previsto nel processo originale per il laterizio. Siccome non andremo a trattare il mattone crudo con questo processo, abbiamo impostato la quantità di prodotto da trattare con questo processo al valore 0 kg
Recupero di una cava di argilla 1 kg	E' stato supposto che, arrivato al termine della sua vita utile, il mattone in terra cruda venga trattato per poi essere utilizzato per il recupero di una cava di argilla Il trattamento di rifiuto Recupero di una cava d'argilla è stato appositamente creato

Tabella 5.22: Trattamento del rifiuto del processo Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)

Nome	Unità funzionale	Note
Recupero di una cava di argilla	1 kg	In una cava di argilla profonda 30m l'area di 0,0000167m ² corrisponde a 1kg di argilla. Perciò 1kg di mattone crudo permette di recuperare 0,0000167m ² di una cava di argilla di profondità di 30m

Tabella 5.23: Recupero di una cava di argilla

Risorsa	Note
Transformation, from mineral extraction site 0,0000167 m ²	E' stato stabilito che con 1 kg di mattone in terra si possa recuperare un area di 0,0000167 m ²

Tabella 5.24: Inputs from nature del processo di trattamento rifiuto Recupero di una cava di argilla

5.3 Analisi dei risultati

Il calcolo viene eseguito con il Metodo IMPACT 2002+ modificato nella versione 141113. Nelle figure 5.1, 5.2, 5.3(a) e 5.3(b) sono raffigurati rispettivamente il network, il diagramma e tutti i dati realtivi al processo del Ciclo di vita di un mattone in terra cruda creato nel database.

5.3.1 Il processo Ciclo di vita di un mattone di terra cruda

Dall'analisi dei risultati della caratterizzazione si nota che:

- in **Carcinogens** il danno vale 0,019853 kg C₂H₃Cleq ed è dovuto per il 78,68% a 4.4157E-6kg di *Hydrocarbons, aromatic* in aria (per il 58,73% in Uso del mattone in terra cruda, e , in particolare, per il 63,84% in Petrol, low sulphur, at regional storage/CH);
- in **Non-carcinogens** il danno vale 0,01587 kg C₂H₃Cleq ed è dovuto per il 27,57% a 3.504E-7kg di *Arsenic* in aria (per il 55,66% in Uso del mattone in terra cruda, e , in particolare, per il 68,09% in Copper, primary, at refinery/RLA), per il 19,13% a 3.4916E-13kg di *Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p-* in aria (per il 53,31% in Uso del mattone in terra cruda, e , in particolare, per il 52,68% in Sinter, iron, at plant/GLO), per il 19,10% a 3.3649E-6kg di *Arsenic, ion* in acqua (per il 55,8% in Uso del mattone in terra cruda, e , in particolare, per il 28,45% in Disposal, dust, unalloyed EAF steel, 15.4% water, to residual material landfill/CH), per il 9,75% a 1.5481E-6 kg di *Zinc* nel suolo(per il 52,22% in Produzione mattoni in terra cruda, e, in particolare, per il 32,17% in Operation, van < 3.5t/RER);
- in **Respiratory inorganics** il danno vale 0,011617 kg PM_{2.5} eq ed è dovuto per il 52,4% a 0.0061115 kg di *Particulates, <2.5 μm* in aria (per il 53,86% in Produzione mattoni in terra cruda, e , in particolare, per il 91,8% in Produzione mattoni in terra cruda), per il 28,82% a 0.0062489 kg di *Particulates, >2.5 μm, and <10 μm* in aria (per il 49,90% in Produzione mattoni in terra cruda, e, in particolare, per il 96,96% in Produzione mattoni in terra cruda), per il 9,02% a 0.0066819 kg di *Particulates, >10 μm* in aria (per il 47,68% in Produzione mattoni in terra cruda, e , in particolare, per il 94,91% in Produzione mattoni in terra cruda);
- in **Ionizing radiation** il danno vale 37,761 Bq C-14 eq ed è dovuto per il 63,55% a 2.0997E-5 Bq di *Radon-222* in aria (per il 50,65% in Uso del mattone in terra cruda, e , in particolare, per il 97,6% in Tallings, uranium milling/GLO), per il 32,25% a 12.177 Bq di *Carbon 14* in aria (per il 50,36% in Uso del mattone in terra cruda, e, in particolare, per il 78,17% in Nuclear spent fuel, in reprocessing, at plant/RER);
- in **Ozone layer depletion** il danno vale 2,205E-7 kg CFC-11 eq ed è dovuto per il 92,97% a 1.7084E-8 kg di *Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301* in aria (per il 55,86% in Uso del mattone in terra cruda, e , in particolare, per il 35,6% in Crude oil, at production onshore/RAF);

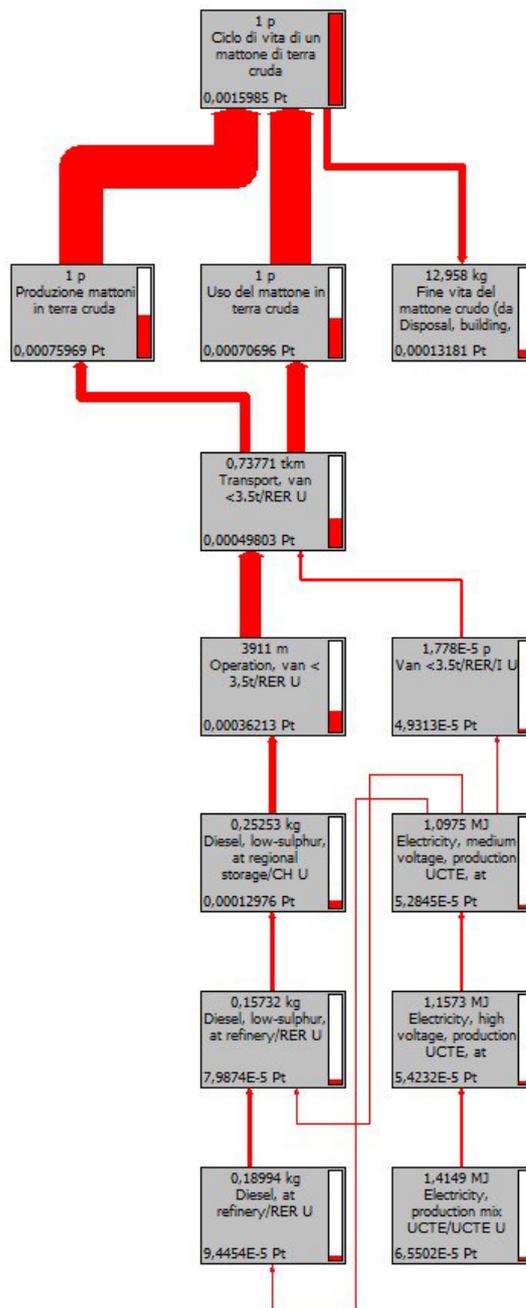


Figura 5.1: Il network del processo Ciclo di vita di un mattone in terra cruda

- in **Respiratory organics** il danno vale 0.0013917 kg C₂H₄ eq ed è dovuto per l'85,92% a 0.0019898 kg di *NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin* in aria (per il 33,55% in Uso del mattone in terra cruda, e , in particolare, per il 40,38% in Operation, van < 3.5t/RER).
- in **Aquatic ecotoxicity** il danno vale 92,429 kg TEG water ed è dovuto per il 35,8% a 9.4637E-6 kg di *Aluminium* nel suolo (per il 54,36% in Uso del mattone in terra cruda, e, in particolare, per il 97,65% in Disposal, drilling

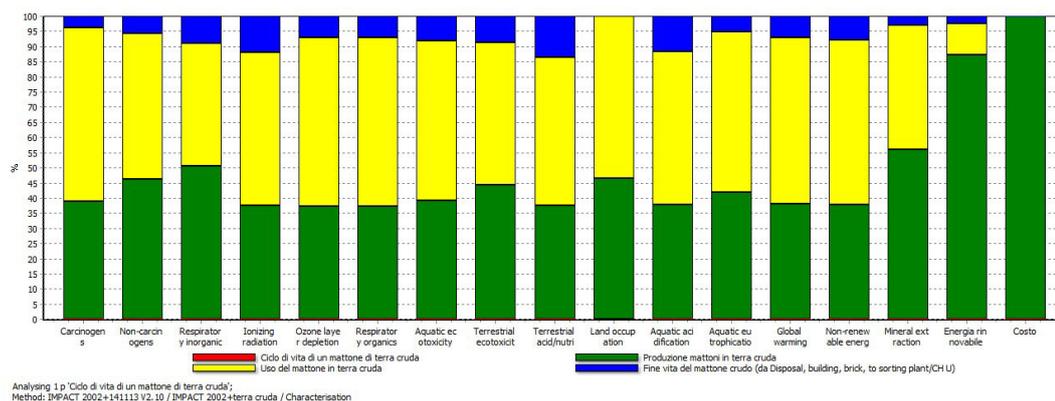


Figura 5.2: Il diagramma della caratterizzazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

SimaPro 7.3 Project	Impact assessment Mattone Terra Cruda	Date: 21/11/2013	Time: 21.09
Calculation:	Analyse		
Results:	Impact assessment		
Product:	1 p Ciclo di vita di un mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)		
Method:	IMPACT 2002+141113 V2.10 / IMPACT 2002+terra cruda		
Indicator:	Characterisation		
Unit:	%		
Skip categories:	With factor = 0		
Exclude infrastructure processes:	No		
Exclude long-term emissions:	No		
Sorted on item:	Impact category		
Sort order:	Ascending		

(a) Dati generali

Impact category	Unit	Total	Ciclo di vita di un mattone di terra cruda	Produzione mattoni in terra cruda	Uso del mattone in terra cruda	Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)
Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,0198534118	0 0,0077211209	0,0113813123	0,0007509787	0,0007509787
Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0,015869546	0 0,0073186898	0,0076612707	0,0008895855	0,0008895855
Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0,0116168556	0 0,0058744956	0,0046867483	0,0010556117	0,0010556117
Ionizing radiation	Bq C-14 eq	37,7611285192	0 14,15358332	19,1058973332	4,5016478656	4,5016478656
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	2,205040517E-007	0 8,24579E-008	1,2231402E-007	1,57320995484211E-008	1,57320995484211E-008
Respiratory organics	kg C2H4 eq	0,0013917414	0 0,0005197375	0,0007725185	9,94853640916064E-005	9,94853640916064E-005
Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	92,4287550147	0 36,309665049	48,6169693431	7,5021206229	7,5021206229
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	36,3021725536	0 16,134451578	16,9733195996	3,1944013763	3,1944013763
Terrestrial acid/nutrient	kg SO2 eq	0,0433486619	0 0,0162188791	0,0212891242	0,0058406586	0,0058406586
Land occupation	m2org.arable	0,9878478966	0 0,4606472932	0,529270414	-0,0020698106	-0,0020698106
Aquatic acidification	kg SO2 eq	0,0074877376	0 0,0028326124	0,0037761151	0,0008790102	0,0008790102
Aquatic eutrophication	kg PO4 P-ilm	0,0002830392	0 0,0001184965	0,0001499727	0,00001457	0,00001457
Global warming	kg CO2 eq	1,5438245493	0 0,5863765805	0,849591742	0,1078562268	0,1078562268
Non-renewable energy	MJ primary	26,852779135	0 10,117816147	14,6453935237	2,0895694646	2,0895694646
Mineral extraction	MJ surplus	0,0597527796	0 0,0333927522	0,0245321751	0,0018278523	0,0018278523
Energia rinnovabile	MJ	3,7012474104	0 3,2331820018	0,3826131986	0,0854522099	0,0854522099
Costo	euro	0,95	0	0,95	0	0

(b) Tabella valori

Figura 5.3: La caratterizzazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

waste, 71.5% water, to landfarming/CH), per 16,76% a 3.1409E-5 kg di *Alu-*

minium in aria (per il 54,56% in Uso del mattone in terra cruda, e, in particolare, per l'81,65% in Blasting/RERU), per il 13,11% a 4.1207E-6 kg di *Copper* in aria (per il 58,77% in Uso del mattone in terra cruda, e, in particolare, per il 72,22% in Operation, van < 3,5t/RER), per il 13,07% a 0.0006289 kg di *Aluminium* in acqua (per il 49,03% in Produzione mattoni in terra cruda, e, in particolare, per il 46,63% in Uranium natural, in yellowcake, at mill plant/RNA), per il 4,14% a 0.00022812 kg di *Zinc, ion* in acqua (per il 51,63% in Uso del mattone in terra cruda, e, in particolare, per il 46,74% in Discharge, produced water, onshore/GLO, per il 3,92% a 1.7719E-7 kg di *Copper* nel suolo (per il 76,27% in Uso del mattone in terra cruda, e, in particolare, per il 60,02% in Distribution network, electricity, low voltage/CH/I), per il 2,92% a 1.6491E-5 kg di *Copper, ion* in acqua (per il 52,75% in Produzione mattoni in terra cruda, e, in particolare, per il 14,14% in Barley straw extensive, at farm /CH), per il 2,34% a 1.5481E-6 kg di *Zinc* nel suolo (per il 44,77% in Uso del mattone in terra cruda, e, in particolare, per l'80,32% in Operation, van < 3,5t/RER);

- in **Terrestrial ecotoxicity** il danno vale 36,302 kg TEG soil ed è dovuto per il 25,21% a 1.5481E-6 kg di *Zinc* nel suolo (per il 44,77% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per l'80,32% in Operation, van < 3,5t/RER), per il 19,77% a 9.4637E-6 kg di *Aluminium* nel suolo (per il 54,36% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 97,66% in Disposal, drilling waste, 71.5%water, to landfarming/CH), per il 13,43% a 4.1207E-6 kg di *Copper* in aria (per il 58,77% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 72,22% in Operation, van < 3,5t/RER), per il 10,94 a 3.1409 kg di *Aluminium* in aria (per il 54,56% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per l'81,65% in Blasting/RER), per il 8,78% a 1.4182E-6 kg di *Chromium* nel suolo (per il 97,75% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 34,81% in Wheat straw IP, at farm/CH), per il 7,08% a 2.5403E-6 kg di *Zinc* in aria (per il 55,78% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 50,9% in Operation, van < 3,5t/RER), per il 3,38% a 1.7719E-7 kg di *Copper* nel suolo (per il 76,27% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 60,02% in Distribution network, electricity, low voltage/CH/I), per il 2,52% a 4.0777E-7 kg di *Chromium VI* nel suolo (per il 46,84% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 68,08% in Distribution network, electricity, low voltage/CH/I);
- in **Terrestrial acid/nutri** il danno vale 0,043349 kg SO2 eq ed è dovuto per il 91,96% a 0.0072641 kg di *Nitrogen oxides* in aria (per il 49,57% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 75,35% in Operation, van <3,5t/RER);
- in **Land occupation** il danno vale 0.98785 m2org.arable ed è dovuto per il 142,45% a 0.044458 m2 *Transformation, to arable, non-irrigated* (per il 99,16% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 32,74% in Barley straw extensive, at farm/CH), per il 50,81% a 0.56985 m2a *Occupation, urban, discontinuously built* (per il 99,99% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 100% in Uso del mattone in terra);

cruda), per il 24.48% a 0.31368 m² *Occupation, industrial area* (per il 99.44% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 99.84% in Produzione mattoni in terra cruda), per il 14.65% a 0.0062579 m² *Transformation, to industrial area* (per il 99.6% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 99.93% in Produzione mattoni in terra cruda). A tale danno si contrappone per il 101.7% *Transformation, from arable, non-irrigated* (per il 98.83% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 32.67% in Barley straw extensive, at farm/CH) e per il 40.04% *Transformation, from pasture and meadow, intensive* (per il 100% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 32.91% in Barley straw extensive, at farm/CH);

- in **Aquatic acidification** il danno vale 0,0074877 kg SO₂ eq ed è dovuto per il 67,91% a 0.0072641 kg di *Nitrogen oxides* in aria (per il 49,57% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 75,35% in Operation, van < 3,5t/RER), per il 29,59% a 0.0022155 kg di *Sulfur dioxide* in aria (per il 54,15% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 24,09% in Natural gas, sour, burned in production flare/MJ/GLO);
- in **Aquatic eutrophication** il danno vale 0,00028304 kg PO₄ P-lim ed è dovuto per il 68,61% a 0.00098575 kg di *Phospate* in acqua (per il 52,99% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 60,22% in Disposal, sulfidic tailings, off-site/GLO), per il 29,92% a 0.0041334 kg di *COD, Chemical Oxygen Demand* in acqua (per il 53,96
- in **Global warming** il danno vale 1,5438 kg CO₂ eq ed è dovuto per il 96,55% a 1.4905 kg di *Carbon dioxide, fossil* in aria (per il 55,14
- in **Non-renewable energy** il danno vale 26,853 MJ primary ed è dovuto per il 69,63% a 0.40826 kg di *Oil, crude, in ground* (per il 55,33% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 25,84% in Crude oil, at production onshore/RAF), per il 13,57% a 6.5081E-6 kg di *Uranium, in ground* (per il 50,69% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 59,47% in Uranium natural, at underground mine/RNA), per il 9,01% a 0.060036 m³ di *Gas, natural, in ground* (per il 53,61% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 26,05% in Natural gas, sweet, burned in produvction flare/MJ/GLO);
- in **Mineral extraction** il danno vale 0,059753 MJ surplus ed è dovuto per il 38,6% a 0.0014132 kg di *Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore, in ground* (per il 51,85% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 99,96% in Ferronickel, 25% Ni, at plant/GLO), per il 24,56% a 0.014638 m³ di *Walter, unspecified natural origin/m3* (per l'88,58% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 92,24% in Sand, at mine/CH), per il 17,15% a 0.010222 m³ di *emphWater, coolin, unspecified natural origin/m3* (per il 54,93% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 9,05% in Lignite, burned in power plant/DE), per il 5,62% a 0.0014114 kg di *Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground* (per il 58,32%

in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare, per il 99,86% in Bauxite, at mine/GLO), per il 5,45% a 8.8481E-5 kg di Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8,2E-3% in crude ore, in ground (per il 48,21% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare, per il 69,83% in Copper, SX-EW, at refinery/GLO);

- in **Energia rinnovabile** il danno vale 3,7012 MJ ed è dovuto per l'81,69% a 3.0236 MJ di Energy, gross calorific value, in biomass (per il 98,28% in Produzione mattoni in terra cruda e, in particolare per il 33,33% in Wheat straw IP, at farmi/CH), per il 17,47% a 0.64656 MJ di Energy, potential (in hydropower reservoir), converted (per il 49,33% in Uso del mattone in terra cruda e, in particolare per il 34,44% in Electricity, hydropower, at run-of.river power plant/RER);

Nelle figure 5.4, 5.5(a) e 5.5(b) sono riportati i risultati del damage assessment.

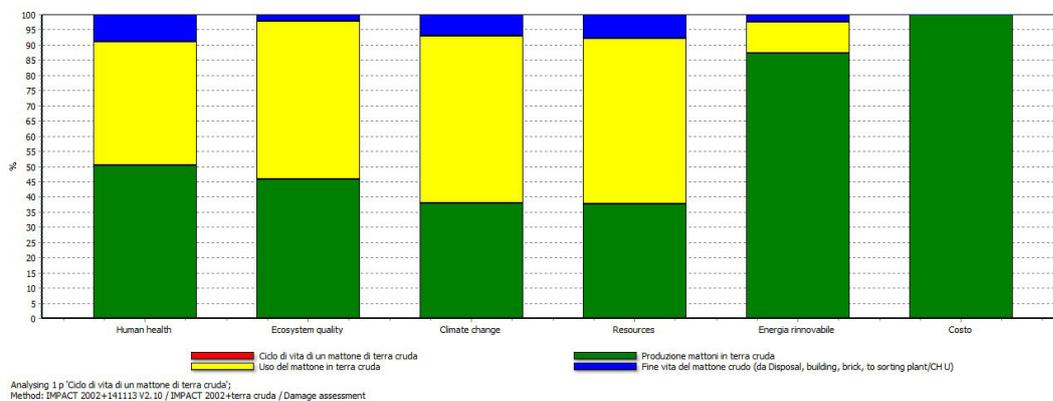


Figura 5.4: Il diagramma del damage assessment del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

Dall'analisi dei risultati del damage assessment si nota che:

- in **Human health** il danno vale 8.2429E-6 DALY ed è dovuto per il 51.9% a Particulates < 2.5 μm, per il 28.43% a Particulates, >2.5mm, and < 10 mm, per l'8.92% a Particulates, >10mm. Il processo che produce il danno massimo è Produzione mattoni in terra cruda (4.1584E-6 DALY per il 50.45%). La categoria di impatto che produce il danno massimo è **Respiratory inorganics** (8.1318E-6 DALY per il 98.65%);
- in **Climate change** il danno vale 1.5438 kgCO2eq. Il processo che produce il danno massimo è Uso del mattone in terra cruda (0.84959 kg CO2 eq per il 55.03%);
- in **Ecosystem quality** il danno vale 1.4136 PDF*m2*yr ed è dovuto per il 108.5% a Transformation, to arable, non-irrigated, per il 38.7% a Occupation, urban, discontinuously built, per il 18.64% a Occupation, industrial area, per l'11.16% a Transformation, to industrial area. Il processo che produce il

Calculation:	Analyse
Results:	Impact assessment
Product:	1 p Ciclo di vita di un mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)
Method:	IMPACT 2002+141113 V2.10 / IMPACT 2002+terra cruda
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	With factor = 0
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	Yes
Sorted on item:	Impact category
Sort order:	Ascending

(a) Dati generali

Impact category	Unit	Total	Ciclo di vita di un mattone di terra cruda	Produzione mattoni in terra cruda	Uso del mattone in terra cruda	Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)
Carcinogens	DALY	5,55895531258E-008	0	2,161913839E-008	3,18676744E-008	2,10274034897587E-009
Non-carcinogens	DALY	4,44347289112E-008	0	2,049233153E-008	2,14515580E-008	2,4908394089757E-009
Respiratory inorganics	DALY	8,13179892942E-006	0	4,112146892E-006	3,28072382E-006	7,38928218417972E-007
Ionizing radiation	DALY	7,92983698903E-009	0	0,000000003	0,000000004	9,4534605177438E-010
Ozone layer depletion	DALY	2,31529254322E-010	0	8,658082737E-011	1,28429722E-010	1,65187045258421E-011
Respiratory organics	DALY	0,000000003	0	1,107040949E-009	1,64546434E-009	2,11903825515122E-010
Aquatic ecotoxicity	PDF*m2*yr	0,0046399235	0	0,0018227452	0,0024405719	0,0003766065
Terrestrial ecotoxicity	PDF*m2*yr	0,2871501849	0	0,127623512	0,134258958	0,0252677149
Terrestrial acid/nutri	PDF*m2*yr	0,0450826084	0	0,0168676343	0,0221406892	0,006074285
Land occupation	PDF*m2*yr	1,0767542073	0	0,5021055495	0,5769047513	-0,0022560935
Global warming	kg CO2 eq	1,5438245493	0	0,5863765805	0,849591742	0,1078562268
Non-renewable energy	MJ primary	26,852779135	0	10,1178161467	14,6453935237	2,0895694646
Mineral extraction	MJ primary	0,0597527796	0	0,0333927522	0,0245321751	0,0018278523
Energia rinnovabile	MJ	3,7012474104	0	3,2331820018	0,3826131986	0,0854522099
Costo	euro	0,95	0	0,95	0	0

(b) Tabella valori

Figura 5.5: Il damage assessment del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

danno massimo è Uso del mattone in terra cruda (0.73574 PDF*m2*yr per il 52.05%). La categoria di impatto che produce il danno massimo è **Land occupation** (1.0768 PDF*m2*yr per il 76.17%);

- in **Resources** il danno vale 26.913 MJ primary ed è dovuto per il 69.48% a *Oil, crude, in ground*, per il 13.54% a *Uranium, in ground*. Il processo che produce il danno massimo è Uso del mattone in terra cruda (14.67 MJ primary per il 54.51%). La categoria di impatto che produce il danno massimo è **Non renewable energy** (26.853 MJ primary per il 99.78%).
- l'**Energia rinnovabile** usata è 3.7012 MJ. Il processo che ne fa maggiore uso è Produzione mattoni in terra cruda (3.2332 MJ, per l'87.36%).
- Il **Costo** è 0.95€.

Nelle figure 5.6, 5.7(a) e 5.7(b) sono riportati i risultati della normalizzazione. Dall'analisi dei risultati della normalizzazione si nota che:

- in **Human Health** il danno sull'intera popolazione europea è 0.0011623 volte il danno prodotto nella stessa categoria dalle attività umane in Europa in 1 anno, riferite ad singolo cittadino europeo;

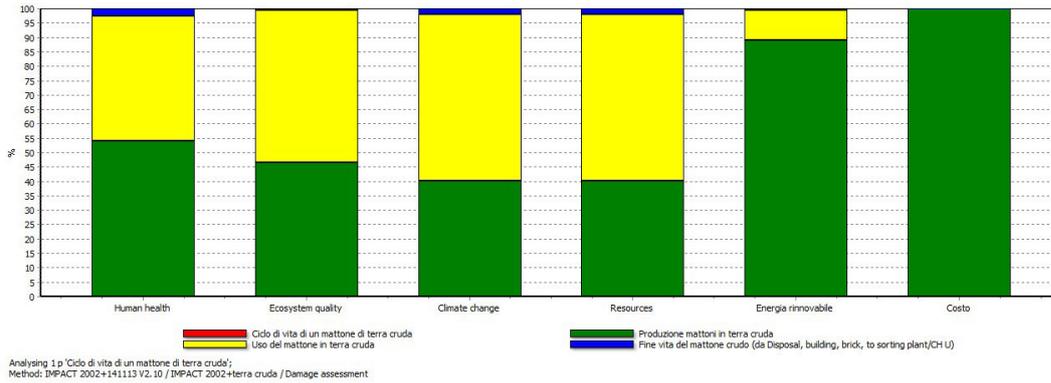


Figura 5.6: Il diagramma della normalizzazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

SimaPro 7.3 Project	Impact assessment Mattone Terra Cruda	Date: 21/11/2013	Time: 21.10
Calculation:	Analyse		
Results:	Impact assessment		
Product:	1 p Ciclo di vita di un mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)		
Method:	IMPACT 2002+141113 V2.10 / IMPACT 2002+terra cruda		
Indicator:	Normalisation		
Skip categories:	With factor = 0		
Exclude infrastructure processes:	No		
Exclude long-term emissions:	No		
Per impact category:	Yes		
Sorted on item:	Impact category		
Sort order:	Ascending		

(a) Dati generali

Impact category	Unit	Total	Ciclo di vita di un mattone di terra cruda	Produzione mattoni in terra cruda	Uso del mattone in terra cruda	Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)
Carcinogens		7,83812699E-006	0	3,04829851E-006	4,49334209E-006	2,96486389E-007
Non-carcinogens		6,26529678E-006	0	2,88941875E-006	3,02466967E-006	3,51208357E-007
Respiratory inorganics		0,0011465836	0	0,0005798127	0,0004625821	0,0001041889
Ionizing radiation		1,11810702E-006	0	4,19087602E-007	5,65725620E-007	1,33293793E-007
Ozone layer depletion		3,26456249E-008	0	1,22078967E-008	1,81085909E-008	2,32913734E-009
Respiratory organics		0,000000418	0	1,56092774E-007	0,000000232	2,98784394E-008
Aquatic ecotoxicity		3,38714416E-007	0	1,33060399E-007	1,78161746E-007	2,74922712E-008
Terrestrial ecotoxicity		0,000020962	0	9,31651637E-006	9,80090394E-006	1,84454319E-006
Terrestrial acid/nutri		0,000003291	0	1,23133730E-006	1,61627031E-006	4,43422802E-007
Land occupation		7,86030571E-005	0	3,66537051E-005	0,000042114	-1,6469483E-007
Global warming		0,0001559263	0	0,000059224	8,58087659E-005	1,08934789E-005
Non-renewable energy		0,0001766913	0	6,65752302E-005	9,63666894E-005	1,37493671E-005
Mineral extraction		3,93173290E-007	0	2,19724310E-007	1,61421712E-007	0,000000012
Energia rinnovabile		3,27412346E-005	0	2,86007280E-005	3,38459635E-006	7,55910249E-007
Costo		6,13152135E-005	0	6,13152135E-005	0	0

(b) Tabella valori

Figura 5.7: La normalizzazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

- in **Ecosystem quality** il danno sulle specie vegetali europee è 0.00010319 volte il danno prodotto nella stessa categoria dalle attività umane in Europa in 1 anno, riferite ad singolo cittadino europeo;
- in **Climate change** il danno è 0.00015593 volte il danno prodotto nella stessa categoria dalle attività umane in Europa in 1 anno, riferite ad singolo cittadino europeo;
- in **Resources** il danno sulle risorse mondiali è 0.00017708 volte il danno prodotto nella stessa categoria dalle attività umane in Europa in 1 anno, riferite ad singolo cittadino europeo;
- l'**Energia rinnovabile** usata è 3.2741E-5 volte il consumo di energia per cittadino europeo in 1 anno;
- il **Costo** è 6.1315E-5 volte lo stipendio medio annuo di un cittadino europeo.

Nelle figure 5.8 e 5.9 sono riportati i risultati della valutazione rispettivamente per impact category e per damage category.

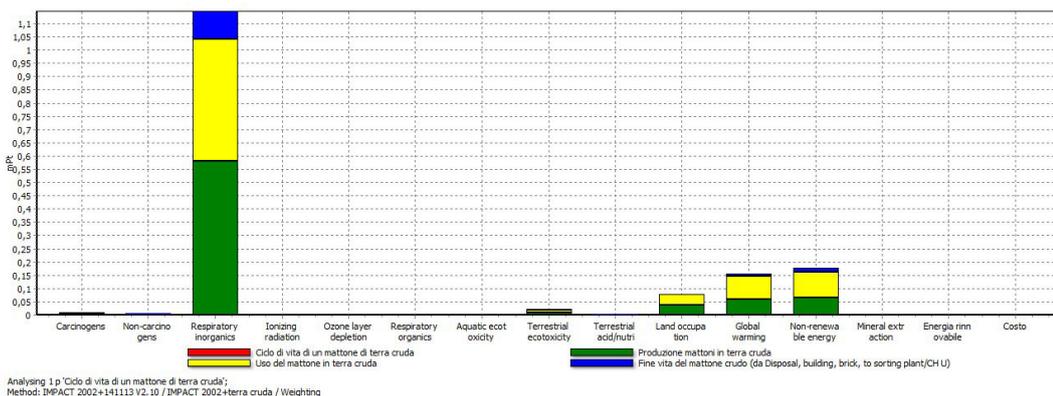


Figura 5.8: Il diagramma della valutazione per impact category del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

Nelle figure 5.10, 5.11(a) e 5.11(b) sono riportati i risultati della valutazione del processo.

Dall'analisi dei risultati della valutazione si nota che:

- il danno totale vale 0.0015985 Pt ed è dovuto per il 47.53% a Produzione mattoni in terra cruda, per il 44.23% a Uso del mattone in terra cruda, per l'8.26% a Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH);
- inoltre il danno è dovuto per il 72.71% a **Human Health**, per il 6.46% a **Ecosystem quality**, per il 9.75% a **Climate change**, per l'11.08% a **Resources**.

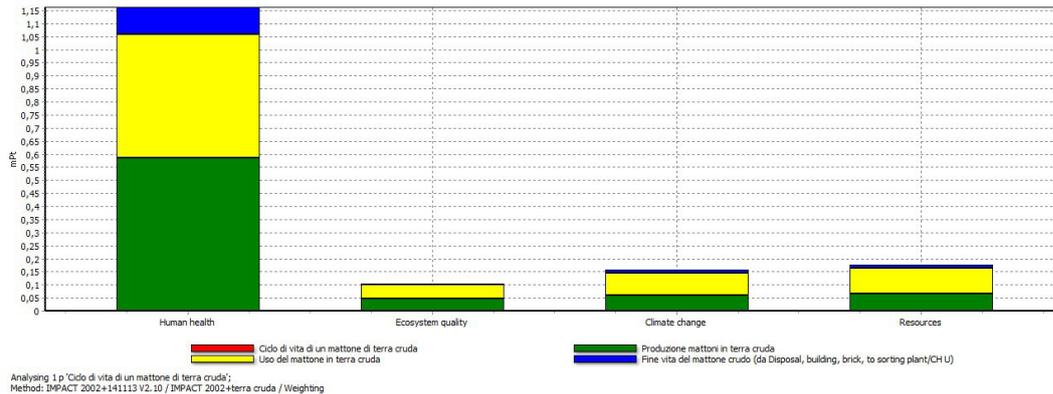


Figura 5.9: Il diagramma della valutazione per damage category del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

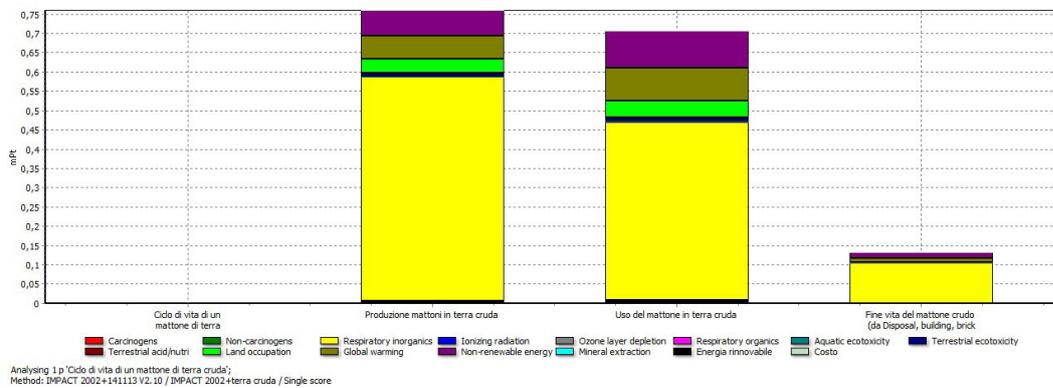


Figura 5.10: Il diagramma della valutazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

5.4 Conclusioni

Dall'analisi dei risultati dell'LCA del mattone in terra cruda si può concludere che:

- il danno è dovuto soprattutto a **Human health** e in particolare a **Respiratory inorganics** a causa delle emissioni di polveri durante la produzione e durante l'uso;
- il fine vita ha un impatto minore di quello degli inerti (vedi figura 5.12) perché il mattone viene usato per recuperare una cava di argilla.

Calculation:	Analyse
Results:	Impact assessment
Product:	1 p Ciclo di vita di un mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)
Method:	IMPACT 2002+141113 V2.10 / IMPACT 2002+terra cruda
Indicator:	Single score
Unit:	mPt
Skip categories:	With factor = 0
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	Yes
Sorted on item:	Impact category
Sort order:	Ascending

(a) Dati generali

Impact category	Unit	Total	Ciclo di vita di un mattone di terra cruda	Produzione mattoni in terra cruda	Uso del mattone in terra cruda	Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)
Total	Pt	0,0015984613	0	0,0007596914	0,0007069622	0,0001318077
Carcinogens	Pt	7,83812699E-006	0	3,04829851E-006	4,49334209E-006	2,96486389E-007
Non-carcinogens	Pt	6,26529678E-006	0	2,88941875E-006	3,02466967E-006	3,51208357E-007
Respiratory inorganics	Pt	0,0011465836	0	0,0005798127	0,0004625821	0,0001041889
Ionizing radiation	Pt	1,11810702E-006	0	4,19087602E-007	5,65725620E-007	1,33293793E-007
Ozone layer depletion	Pt	3,26456249E-008	0	1,22078967E-008	1,81085909E-008	2,32913734E-009
Respiratory organics	Pt	0,000000418	0	1,56092774E-007	0,000000232	2,98784394E-008
Aquatic ecotoxicity	Pt	3,38714416E-007	0	1,33060399E-007	1,78161746E-007	2,74922712E-008
Terrestrial ecotoxicity	Pt	0,000020962	0	9,31651637E-006	9,80090394E-006	1,84454319E-006
Terrestrial acid/nutri	Pt	0,000003291	0	1,23133730E-006	1,61627031E-006	4,43422802E-007
Land occupation	Pt	7,86030571E-005	0	3,66537051E-005	0,000042114	-1,64694828E-007
Global warming	Pt	0,0001559263	0	0,000059224	8,58087659E-005	1,08934789E-005
Non-renewable energy	Pt	0,0001766913	0	6,65752302E-005	9,63666894E-005	1,37493671E-005
Mineral extraction	Pt	3,93173290E-007	0	2,19724310E-007	1,61421712E-007	0,000000012
Energia rinnovabile	Pt	0	0	0	0	0
Costo	Pt	0	0	0	0	0

(b) Tabella valori

Figura 5.11: La valutazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo

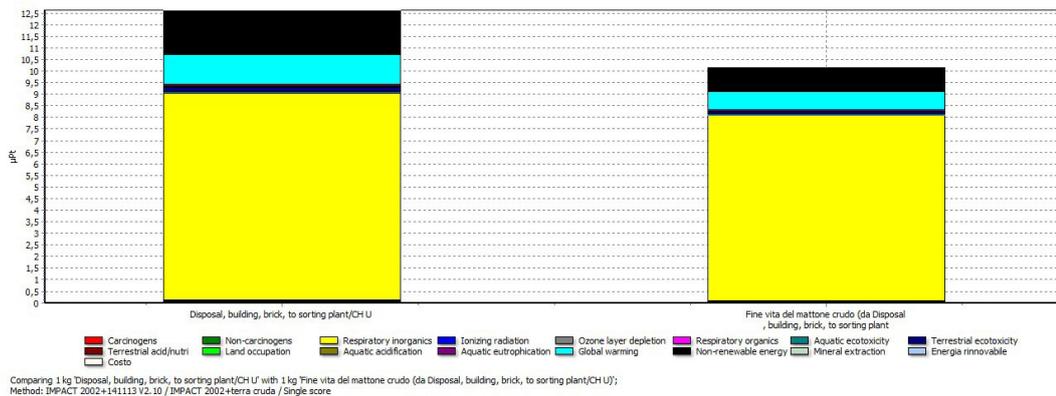


Figura 5.12: il diagramma del confronto tra i processi Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U) e Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U

L'LCA del confronto tra una muratura in terra cruda e una in laterizio a parità di capacità portante

6.1 Obiettivo dello studio e campo di applicazione

6.1.1 Obiettivo dello studio

Obiettivo dello studio è il confronto tra il danno dovuto ad una muratura in terra cruda e una in laterizio

6.1.2 Campo di applicazione

6.1.2.1 Unità funzionale

Obiettivo dello studio è il confronto tra il danno dovuto ad una muratura in terra cruda e una in laterizio.

6.1.2.2 La funzione del sistema

La funzione della parete è quello di permettere la creazione di una struttura verticale portante per edifici resistente ad un carico statico di un solaio interpiano e di una copertura.

6.1.2.3 I confini del sistema

I confini del sistema vanno dalla raccolta delle materie prime fino al fine vita dei componenti. Il ciclo di vita delle pareti considera la produzione dei mattoni e della malta, l'uso delle pareti con l'energia termica necessaria per mantenere durante l'inverno una temperatura interna di 20°C e durante l'estate una temperatura di 26°C, il fine vita della parete in terra cruda (uguale a quella considerata per il mattone) e della parete in laterizio (riciclo).

6.1.2.4 La qualità dei dati

I dati sono primari per quanto riguarda la produzione del mattone. Per l'estrazione delle materie prime che costituiscono il mattone (argilla, sabbia, paglia) e le attrezzature necessarie come la molazza e lo stampo, per l'energia elettrica e per i trasporti sono usati i processi di banca dati Ecoinvent. Per la produzione delle attrezzature vengono costruiti processi ad hoc. Per il laterizio è stato usato il processo di banca dati modificato nelle emissioni di polveri: sono state inserite le stesse polveri stimate per il mattone in terra cruda al netto di quelle già considerate dal processo originale. Nel confronto non è stata considerata l'emissione di polveri durante l'uso. Per il calcolo viene usato il codice SimaPro 7.3.3. Per la valutazione del danno viene usato il Metodo IMPACT 2002+ modificato durante studi precedenti.

6.2 Inventario

6.2.1 La parete in terra cruda

Come riferimento è stata presa una parete in terra cruda in grado di sopportare un carico statico di un solaio di interpiano e di una copertura. Per ottenere questo risultato, a causa della scarsa resistenza a compressione dei mattoni in terra cruda (si veda il cap. 2) è necessaria una parete con uno spessore minimo di 40cm¹. Una parete costituita da mattoni di terra cruda con queste caratteristiche non può essere considerata a norma in zone soggette ad azione sismica in quanto, in queste, è necessario che la parete abbia una resistenza a compressione minima di 5 MPa². E' stato implementato un processo ad hoc che integri tutti gli aspetti riguardanti la parete. Il processo è stato chiamato 1m2 di parete con mattoni crudi.

Nome	Unità funzionale	Note
1m2 di parete con mattoni crudi	1 p	Il processo riguarda la produzione di una parete di 1m2 di mattoni crudi Il mattone è quello realizzato dalla ditta Fratelli Coni ed utilizzato nel cantiere di Pabillonis Tessitura della parete: a blocco Spessore della parete: 40cm Numero di mattoni necessari: 39 Coefficiente di conducibilità termica: 0.8-0.9W/m°C

Tabella 6.1: 1m2 di parete con mattoni crudi

¹si veda [8]

²si veda [25]

Lavorazioni	Note
Produzione mattoni in terra cruda 39 p	Descrive la produzione dei mattoni in terra cruda della ditta Fratelli Coni
Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda 39 p	Descrive la realizzazione della malta nel cantiere di Pabillonis. Il processo è stato creato ad hoc

Tabella 6.2: Lavorazioni del processo 1m2 di parete con mattoni crudi

Trasporto	Note
Transport, van <3.5t/RER U 12,985*39*35 kgkm	Trasporto di 39 mattoni del peso di 12,985 kg dall'impianto produttivo di Fratelli Coni in Ales(OR) al cantiere di Pabillonis(VS) Distanza percorsa: 35 km

Tabella 6.3: Trasporti del processo 1m2 di parete con mattoni crudi

Energia	Note
Heat, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW/RER U 0,85/0,4*1*25*5*30*16 Wh	Energia per il riscaldamento invernale: $E = Q * t$ dove: $t = 100anni * 5mesi/anno * 30g/m * 16h/g$ $Q = \frac{k}{s} S \Delta T$ dove: $k = 0.85 \frac{W}{mC}$ $s = 0.4m$ $S = 1m^2$ $\Delta T = 20 - (-5)(Bologna)$ Quindi: $E = 0.85/0.4 * 1 * 25 * 5 * 30 * 16$
Heat, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW/RER U 0,85/0,4*1*13,42*5*30*8 Wh	Energia per il raffrescamento estivo: $E = Q * t$ dove: $t = 100anni * 3mesi/anno * 30g/m * 8h/g$ $Q = \frac{k}{s} S \Delta T_{eq}$ dove: $k = 0.85 \frac{W}{mC}$ $s = 0.4m$ $S = 1m^2$ Per ricavare ΔT_{eq} da tabelle: Densità mattone: 1624kg/m ³ Massa superficiale: 1624*0.4=649.6kg/m ² Interpolazione attraverso massa superficiale: $\Delta T_{eq} = 10.2 + (12.5 - 10.2)/(700 - 500) * (649.6 - 500) = 11.92$ Per ricavare il fattore correttivo di ΔT_{eq} da tabelle: $T_{max} - T_{int} = 35 - 26 = 9$ $T_{max} - T_{min} = 35 - 25 = 10$ $\Delta T_{eq} = 11.92 + 1.5 = 13.42$ Quindi: $E = 0.85/0.4 * 1 * 13.42 * 5 * 30 * 8$

Tabella 6.4: Energia del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

Trattamento rifiuti	Note
Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U) 12,985*39 kg	Il processo di trattamento dei mattoni è stato già descritto in precedenza. Qui viene richiamato per una quantità pari al peso dei 39 mattoni

Tabella 6.5: Trattamento rifiuti del processo 1m2 di parete con mattoni crudi

6.2.1.1 La produzione della malta di terra

Nome	Unità funzionale	Note
Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda	1 p	Malta per allettare un singolo mattone di terra cruda Si è supposto che l'impasto per realizzare la malta fosse il medesimo di quello utilizzato per i mattoni Volume della malta a secco: 0.0024 m3 Poiché tutta l'acqua evapora, il peso della malta a secco vale: $1,24+2.596+0.051=3.887\text{kg}$ Si suppone che durante la lavorazione venga rilasciato lo 0.1% di particolato. Quindi le quantità dei componenti devono essere maggiorati del fattore 0.1%

Tabella 6.6: Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda

Materiali	Note
Clay, at mine/CH 1,240*1,001 kg	Terra: si assume che la terra sia argilla
Sand, at mine/CH 2,596*1,001 kg	Sabbia proveniente da Simaxis
Straw IP, at farm/CH 0,051*1,001 kg	Paglia - si assume una coltivazione intensive production realizzata in loco
Tap water, at user/RER 0,115*1,001 kg	Acqua di rete

Tabella 6.7: Materiali del processo Produzione dei mattoni in terra cruda

Strumento	Note
Molazza150 1/30000*15/60 p	Molazza 150 Peso della molazza: 750kg Tempo di vita: 30000h Durata della lavorazione: 15min

Tabella 6.8: Strumenti del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda

Trasporto	Note
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 750*1/30000*15/60*256 kgkm	Trasporto della Molazza150 dal sito di produzione di Officine Polieri a Modugno (BA) al porto di Napoli per il successivo trasporto via mare alla Sardegna: 256km
Transport, barge/RER U 750*1/30000*15/60*498 kgkm	Trasporto della Molazza150 via mare da Napoli a Cagliari: 498km
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 750*1/30000*15/60*66,4 kgkm	Trasporto della Molazza150 su strada da Cagliari al cantiere di Pabillonis: 66,4 km
Transport, van <3.5t/RER U 2,596*1,001*53,9 kgkm	Trasporto della sabbia dall'azienda produttrice a Simaxis (OR) al cantiere di Pabillonis (VS): 53,9 km

Tabella 6.9: Trasporti del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda

Energia	Note
Electricity, low voltage, at grid/IT U 2*0,745699872*15/60 kWh	Rappresenta la quota parte di energia elettrica necessaria alla Molazza150 per lavorare l'impasto Potenza della Molazza150: 2 HP 1HP=0.745699872 kilowatts

Tabella 6.10: Energia del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda

Emissioni	Note
Particulates, < 2.5 μm 3,887*0,001/3 kg	Si è supposto che durante la manipolazione si disperda nell'ambiente, in aria, lo 0.1% in peso dei materiali utilizzati per la produzione di un quantitativo di malta necessario per allettare un singolo mattone, sotto forma di particolato in parti uguali nelle tre diverse tipologie
Particulates, > 2.5 μm , and < 10 μm 3,887*0,001/3 kg	
Particulates, > 10 μm 3,887*0,001/3 kg	

Tabella 6.11: Emissioni del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda

La molazza La molazza utilizzata è il modello 150 prodotto da Officine Polieri. Il processo che la descrive è identico a quello della Molazza200, a cambiare sono soltanto il peso della molazza, 750 kg in questo caso e la potenza, 2 HP.

6.2.2 La parete in laterizio

Come riferimento è stata presa una parete in laterizio in grado di sopportare un carico statico di un solaio di interpiano e di una copertura. Per ottenere questo risultato, nonostante una resistenza a compressione pari a 10 volte quella del mattone in terra cruda (si va dai 10 ai 55 N/mm²), è necessaria una parete con uno spessore minimo di 30cm affinché questa rispetti le Norme tecniche per le costruzioni previste dal D.M. 14/01/2008 per le pareti portanti realizzate in zone non soggette ad azione sismica. E' stato implementato un processo ad hoc che integri tutti gli aspetti riguardanti la parete. Il processo è stato chiamato 1m2 di parete con mattoni crudi.

Nome	Unità funzionale	Note
1m2 di parete di laterizio	1 p	La produzione di una parete di 1m2 di mattoni in laterizio Supponiamo che i mattoni utilizzati abbiano dimensioni: 10x20x30 cm Numero di mattoni per m2: 39 Coefficiente di conducibilità termica: 0.33W/m°C Massa volumica lorda: 1705kg/m3 Tessitura della parete: a blocco

Tabella 6.12: 1m2 di parete di laterizio

Lavorazioni	Note
Brick, at plant/RER U (con emissioni di particolato come mattoni crudi) 39*1,7*6 kg	Per il calcolo del peso di 1 mattone in laterizio di dimensione 30x20x10 cm: Volume: 30*20*10=6000cm ³ =6dm ³ Densità: 1.7kg/dm ³
Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio 39 p	Il trasporto della malta è interna al processo stesso

Tabella 6.13: Lavorazioni del processo 1m2 di parete di laterizio

Trasporto	Note
Transport, van <3.5t/RER U 39*1,7*6*269 kgkm	Trasporto dei laterizi dall'impianto produttivo di Laterizi Valpescara sito a Brecciarola di Chieti al porto di Civitavecchia per il successivo trasporto via mare per la Sardegna Distanza percorsa: 269 km
Transport, barge tanker/RER U 39*1,7*6*236 kgkm	Trasporto dei laterizi da a Civitavecchia a Olbia Distanza percorsa: 236 km
Transport, van <3.5t/RER U 39*1,7*6*221 kgkm	Trasporto dei laterizi da Olbia a Pabillonis Distanza percorsa: 221 km

Tabella 6.14: Trasporti del processo 1m2 di parete di laterizio

Energia	Note
Heat, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW/RER U 0,33/0,3*1*25*5*30*16 Wh	Energia per il riscaldamento invernale: $E = Q * t$ dove: $t = 100anni * 5mesi/anno * 30g/m * 16h/g$ $Q = \frac{k}{s} S \Delta T$ dove: $k = 0.33 \frac{W}{mC}$ $s = 0.3m$ $S = 1m^2$ $\Delta T = 20 - (-5)(Bologna)$ Quindi: $E = 0.33/0.3 * 1 * 25 * 5 * 30 * 16$
Heat, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW/RER U 0,33/0,3*1*16,015*5*30*8 Wh	Energia per il raffrescamento estivo: $E = Q * t$ dove: $t = 100anni * 3mesi/anno * 30g/m * 8h/g$ $Q = \frac{k}{s} S \Delta T_{eq}$ dove: $k = 0.33 \frac{W}{mC}$ $s = 0.4m$ $S = 1m^2$ Per ricavare ΔT_{eq} da tabelle: Densità mattone: 1703kg/m ³ Massa superficiale: 1703*0.3=510.9kg/m ² Interpolazione attraverso massa superficiale: $\Delta T_{eq} = 14.7 + (11.3 - 14.7)/(700 - 500) * (510.9 - 500) = 14.515$ Per ricavare il fattore correttivo di ΔT_{eq} da tabelle: $T_{max} - T_{int} = 35 - 26 = 9$ $T_{max} - T_{min} = 35 - 25 = 10$ $\Delta T_{eq} = 14.515 + 1.5 = 16.015$ Quindi: $E = 0.33/0.3 * 1 * 16.015 * 5 * 30 * 8$

Tabella 6.15: Energia del processo 1m2 di parete di laterizio

Trattamento rifiuti	Note
Disposal, building, brick, to recycling/CH U 39*1,7*6 kg	Il processo di trattamento dei mattoni è interno al database Ecoinvent. Qui viene richiamato per una quantità pari al peso dei 39 mattoni

Tabella 6.16: Trattamento rifiuti del processo 1m2 di parete di laterizio

6.2.2.1 Il processo Brick, at plant/RER U (con emissioni di particolato come mattoni crudi)

Il processo in questione è stato creato a partire dal processo omonimo presente nel database Ecoinvent. Nel processo utilizzato in questo studio sono state inserite le emissioni di particolari come quelle previste nella produzione dei mattoni crudi, al netto di quelle già considerate nel processo originale. Non è chiaro se le emissioni già previste nel processo avessero origine dalla manipolazione dei materiali ma si è supposto che fosse così.

6.2.2.2 La produzione della malta cementizia

Nome	Unità funzionale	Note
Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio	1 p	Malta per allettare un singolo mattone in laterizio Volume del mattone: $0.10*0.20*0.30=0.006m^3$ Volume della malta a secco: $(0.02*0.1*0.3+0.02*0.2*0.3)=0.0018m^3$ Poiché tutta l'acqua evapora, il peso della malta a secco vale: $0,51429+1,9286=2.4429kg$ Si suppone che durante la lavorazione venga rilasciato lo 0.1% di particolato. Quindi le quantità dei componenti devono essere maggiorati del fattore 0.1%

Tabella 6.17: Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio

Materiali	Note
Cement, unspecified, at plant/CH U 400/1,4*0,0018*1,001 kg	Cemento - la malta cementizia prevede 400kg di cemento per la produzione di circa 1.40 m3 di malta
Sand, at mine/CH 1*1500/1,4*0,0018*1,001 kg	Sabbia - la malta cementizia prevede 1 m3 di sabbia per la produzione di circa 1.40 m3 di malta. E' stata considerata una densità della sabbia di 1500 kg/m3
Tap water, at user/RER 160/1,4*0,0018*1,001 kg	Acqua di rete - la malta cementizia prevede 160 l di acqua per la produzione di circa 1.40 m3 di malta.

Tabella 6.18: Materiali del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio

Strumento	Note
Betoniera Orion 300 1/30000*7/60 p	Betoniera Orion 300 Officine Polieri Peso della betoniera: 215kg Tempo di vita: 30000h Durata della lavorazione: 7min per fare il pieno di impasto 150l di impasto Si suppone che la durata sia indipendente dal volume da trattare

Tabella 6.19: Strumenti del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio

Trasporto	Note
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 750*1/30000*15/60*256 kgkm	Trasporto della Betoniera Orion 300 dal sito di produzione di Officine Polieri a Modugno (BA) al porto di Napoli per il successivo trasporto via mare alla Sardegna: 256km
Transport, barge/RER U 750*1/30000*15/60*498 kgkm	Trasporto della Molazza150 via mare da Napoli a Cagliari: 498km
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U 750*1/30000*15/60*66,4 kgkm	Trasporto della Molazza150 su strada da Cagliari al cantiere di Pabillonis: 66,4 km
Transport, van <3.5t/RER U 400/1,4*0,0018*1,001*160 kgkm	trasporto del cemento da Alghero (SS) al cantiere di Pabillonis (VS): 160km
Transport, van <3.5t/RER U 1*1500/1,4*0,0018*1,001*53,9 kgkm	Trasporto della sabbia dall'azienda produttrice a Simaxis (OR) al cantiere di Pabillonis (VS): 53,9 km

Tabella 6.20: Trasporti del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio

Energia	Note
Electricity, low voltage, at grid/IT U 2*0,745699872*7/60 kWh	Rappresenta la quota parte di energia elettrica necessaria alla Betoniera Orion 300 per lavorare l'impasto Potenza della Betoniera Orion 300: 2 HP 1 HP=0.745699872 kilowatts

Tabella 6.21: Energia del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio

Emissioni	Note
Particulates, < 2.5 μm 2,4429*0,001/3 kg	Si è supposto che durante la manipolazione si disperda nell'ambiente, in aria, lo 0.1% in peso dei materiali utilizzati per la produzione di un quantitativo di malta necessario per allettare un singolo mattone, sotto forma di particolato in parti uguali nelle tre diverse tipologie
Particulates, > 2.5 μm , and < 10 μm 2,4429*0,001/3 kg	
Particulates, > 10 μm 2,4429*0,001/3 kg	

Tabella 6.22: Emissioni del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio

La betoniera Per descrivere la betoniera e tutti gli aspetti che la riguardano è stato utilizzato un processo identico a quello delle molazze ma andando ad impostare il parametro peso a 215 kg. La potenza della Betoniera Orion 300 è di 2 lh ed è prodotta da Officine Polieri.

6.3 Confronto di una muratura in terra cruda e una in laterizio a parità di capacità portante

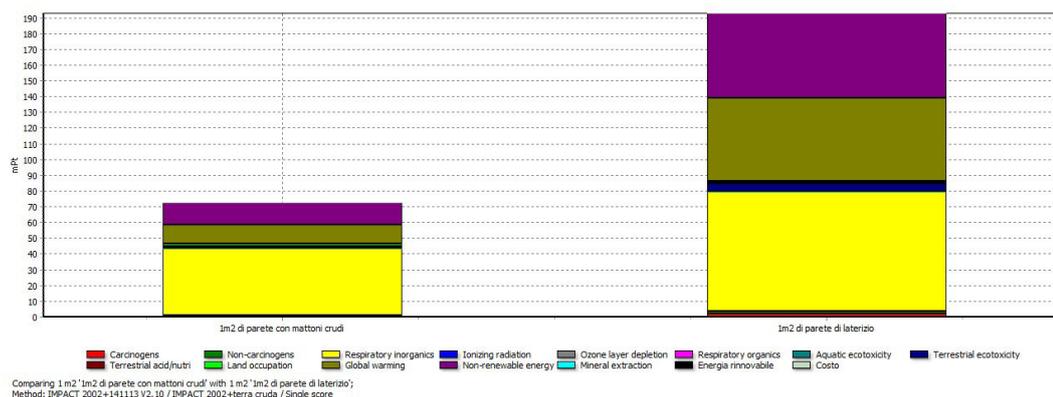


Figura 6.1: Confronto fra due pareti di 1m² in terra cruda e in laterizio

Dall'analisi dei risultati della valutazione del confronto si nota che:

- il danno della parete in mattoni crudi è il 37.66% di quello prodotto dalla parete in laterizio;
- in **Human Health** il danno della parete in mattoni crudi è il 54.3% di quello della parete in laterizio soprattutto a causa di Particulates, <2.5 µm in aria e a *Nitrogen oxides* in aria (in particolare in Operation, van < 3.5t/RER dovuto al trasporto del laterizio);
- in **Ecosystem quality** il danno della parete in mattoni crudi è il 45.16% di quello della parete in laterizio soprattutto a causa di *Aluminium* nel suolo (in particolare in Disposal, drilling waste, 71.5% water, to landfarming/CH U dovuto al trasporto del laterizio a causa del processo applicato allo scopo di bonificare il terreno estratto durante la perforazione per ottenere pozzi petroliferi), a *Zinc* nel suolo (in particolare in Operation, van < 3.5t/RER dovuto al trasporto del laterizio), a *Nitrogen oxides* e *Copper* in aria (in particolare in Operation, van < 3.5t/RER dovuto al trasporto del laterizio) e *Aluminium* in aria (in particolare in Blasting/RER dovuto al trasporto del laterizio a causa del materiale che costituisce il mezzo di trasporto);
- in **Climate change** il danno della parete in mattoni crudi è il 23.26% di quello della parete in laterizio soprattutto a causa di *Carbon dioxide, fossil* in aria (in particolare in Operation, van < 3.5t/RER dovuto al trasporto del laterizio);

Calculation:	Compare
Results:	Impact assessment
Product 1:	1 m2 1m2 di parete con mattoni crudi (of project Mattone Terra Cruda)
Product 2:	1 m2 1m2 di parete di laterizio (of project Mattone Terra Cruda)
Method:	IMPACT 2002+141113 V2.10 / IMPACT 2002+terra cruda
Indicator:	Single score
Unit:	mPt
Skip categories:	With factor = 0
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	Yes
Sorted on item:	Impact category
Sort order:	Ascending

Impact category	Unit	1m2 di parete con mattoni crudi	1m2 di parete di laterizio
Total	Pt	0,0726490053	0,192898397
Carcinogens	Pt	0,0005722629	0,00233496
Non-carcinogens	Pt	0,0004040731	0,001547666
Respiratory inorganics	Pt	0,0421732261	0,075322594
Ionizing radiation	Pt	5,99795E-005	0,000286032
Ozone layer depletion	Pt	2,58725E-006	9,8487E-006
Respiratory organics	Pt	2,27338E-005	0,000118151
Aquatic ecotoxicity	Pt	2,08151E-005	8,9271E-005
Terrestrial ecotoxicity	Pt	0,0012994667	0,004784145
Terrestrial acid/nutri	Pt	0,0001737218	0,000853682
Land occupation	Pt	0,0016176065	0,001162791
Global warming	Pt	0,0121700572	0,052323101
Non-renewable energy	Pt	0,0140932834	0,053981055
Mineral extraction	Pt	0,000039192	8,5103E-005
Energia rinnovabile	Pt		0 0
Costo	Pt		0 0

Figura 6.2: La valutazione del confronto fra 1m2 di una parete in terra cruda e 1m2 di una parete in laterizio

- in **Resources** il danno della parete in mattoni crudi è il 45.16% di quello della parete in laterizio soprattutto a causa di *Oil, crude, in ground* (in particolare in Crude oil, at production onshore/RAF dovuto al trasporto del laterizio), a *Natural gas, in ground* (in particolare in Natural gas, at production onshore/RU dovuto alla cottura del al laterizio), a *Uranium, in ground* (in

particolare in Uranium natural, at underground mine/RNA dovuto al trasporto del laterizio a causa dell'energia elettrica usata per la manutenzione dell'automezzo).

6.3.1 Confronto tra la malta di terra e quella cementizia

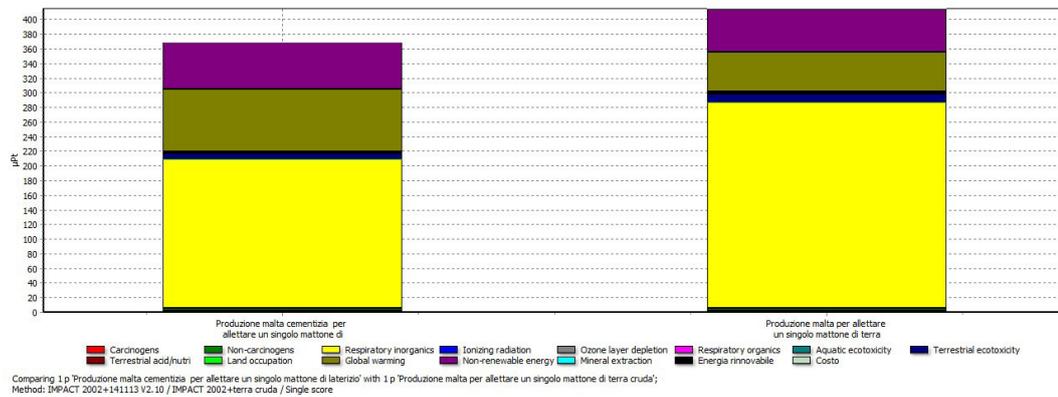


Figura 6.3: Diagramma della valutazione del confronto tra la malta di terra e quella cementizia

Dall'analisi dei risultati si nota che:

- la malta di terra produce un danno maggiore del 12.47% di quella cementizia soprattutto nella categoria di impatto **Respiratory inorganics** soprattutto a causa del minore quantità di materiale usato nella produzione della malta cementizia, nonostante venga usato il cemento e venga considerato il trasporto del cemento.

SimaPro 7.3 Impact assessment Date: 22/11/2013
 Project Mattone Terra Cruda Time: 14.03

Calculation:	Compare
Results:	Impact assessment
Product 1:	1 p Produzione malta cementizia per allestire un singolo mattone di laterizio (of project Mattone Terra Cruda)
Product 2:	1 p Produzione malta per allestire un singolo mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)
Method:	IMPACT 2002+141113 V2.10 / IMPACT 2002+terra cruda
Indicator:	Single score
Unit:	µPt
Skip categories:	With factor = 0
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	Yes
Sorted on item:	Impact category
Sort order:	Ascending

Impact category	Unit	Produzione malta cementizia per allestire un singolo mattone di laterizio	Produzione malta per allestire un singolo mattone di terra cruda
Total	Pt	0,0003690754	0,0004151183
Carcinogens	Pt	2,47888881228E-006	2,4689407662E-006
Non-carcinogens	Pt	3,32818429122E-006	3,6255058189E-006
Respiratory inorganics	Pt	0,0002031196	0,0002806908
Ionizing radiation	Pt	4,18509902363E-007	3,4650161751E-007
Ozone layer depletion	Pt	1,06718894254E-008	9,1903217456E-009
Respiratory organics	Pt	1,17249366816E-007	9,1731558255E-008
Aquatic ecotoxicity	Pt	1,36653617927E-007	1,5526724641E-007
Terrestrial ecotoxicity	Pt	7,03542430523E-006	1,0676373691E-005
Terrestrial acid/nutri	Pt	1,08035314897E-006	8,8655939397E-007
Land occupation	Pt	1,27843516304E-006	2,2845640485E-006
Global warming	Pt	8,62260896082E-005	0,000054282
Non-renewable energy	Pt	6,36554780222E-005	5,9013627680E-005
Mineral extraction	Pt	1,89839357041E-007	5,8726450293E-007
Energia rinnovabile	Pt	0	0
Costo	Pt	0	0

Figura 6.4: La valutazione del confronto fra la malta in terra cruda e la malta cementizia

6.4 Conclusioni

Dal confronto tra la parete di mattoni crudi e quella in laterizio di può concludere che:

- il danno della parete in mattoni crudi è il 37.66% di quello prodotto dalla

parete in laterizio;

- il danno della parete in laterizio è maggiore per tutte le categorie di danno;
- le cause principali di tale differenza sono il trasporto su strada del laterizio da Chieti a Civitavecchia e da Olbia a Pabillonis.

Analisi dei Costi Esterni

Al termine dell'analisi LCA, si può completare lo studio quantificando in termini monetari il danno ambientale prodotto. Tale costo che si definisce "esterno" per distinguerlo da quello stabilito dal mercato, chiamato "interno", rappresenta il costo sostenuto dalla Comunità (locale, nazionale, internazionale) per rimediare ai danni prodotti sull'ambiente. Il costo economico viene indicato come un possibile fattore limitativo per la diffusione di interventi a sostegno della riduzione dell'impatto: in particolare per le economie non emerse e quindi per quei settori, come soprattutto quello agroalimentare, che in quei contesti rivestono il ruolo più importante. Non vengono messe in conto le esternalità, quindi la valutazione di costi e benefici viene estesa a una scala temporale ridotta, e soprattutto non vengono contemplati i vantaggi - direttamente economici - di una maggiore integrazione su scala locale delle attività economiche, integrazione che per più ragioni concorrenti rappresenta il corollario di politiche per la riduzione del danno.

7.1 Calcolo del processo Ciclo di vita di un mattone crudo con EPS

Il Metodo EPS 2000, esprime il danno ambientale direttamente in unità monetarie (ELU equivalenti agli Euro), che corrispondono alla disponibilità a pagare (willingness to pay) da parte dell'intero pianeta. La disponibilità a pagare rappresenta un criterio per definire i costi esterni. Il calcolo è stato eseguito con EPS 2000 2.03 modificato nella versione EPS 200410 V2.03/EPS I

Dall'analisi dei risultati si nota che:

- il danno totale vale 1.9549 Pt(= €) ed è dovuto per il 45.02% a Produzione mattoni in terra cruda, per il 48.86% a Uso del mattone in terra cruda, per il 6.11% a Fine vita del mattone;

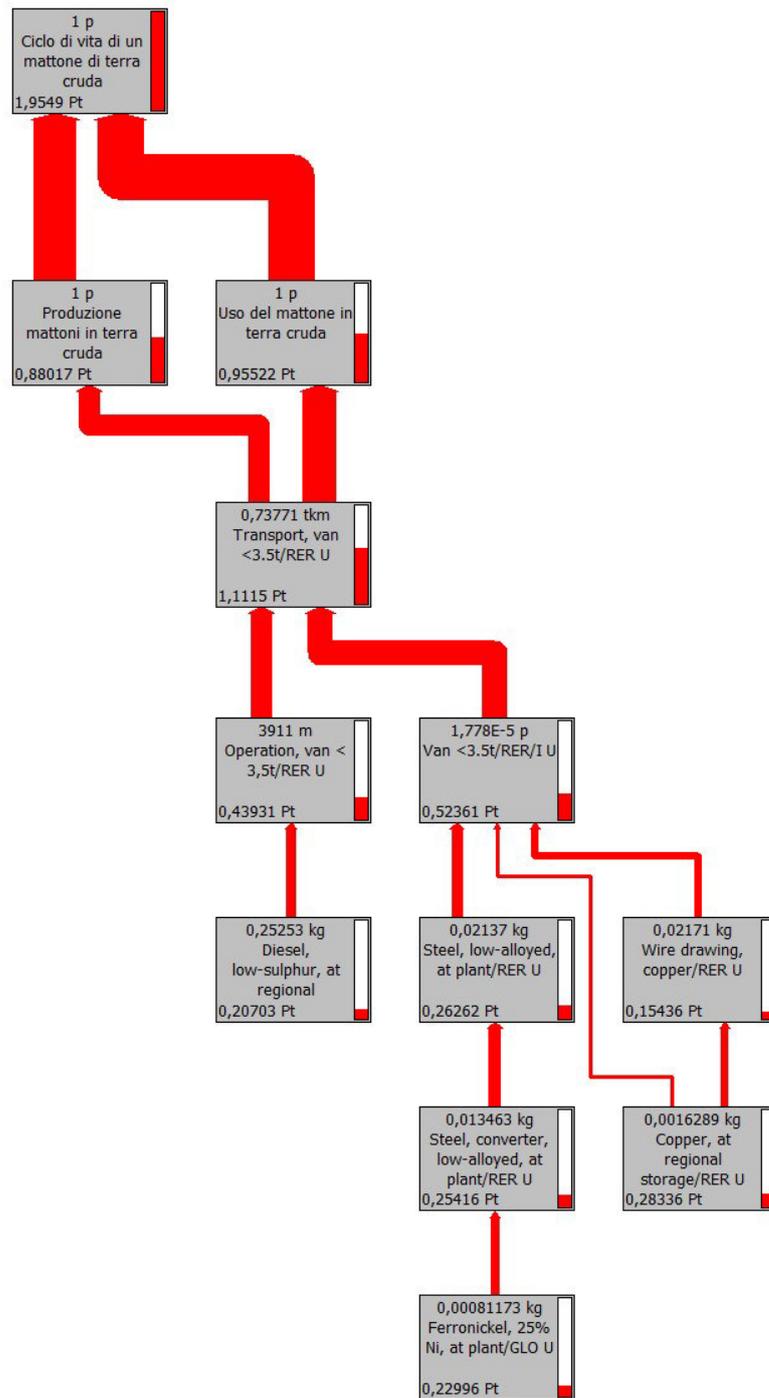


Figura 7.1: Network del processo Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con EPS

- inoltre il danno è dovuto per il 46.09% a **Human health**, per il 2.13% a **Eco-system production capacity**, per il 49.1% a **Abiotic stock resources**, per il 2.67% a **Biodiversity**.

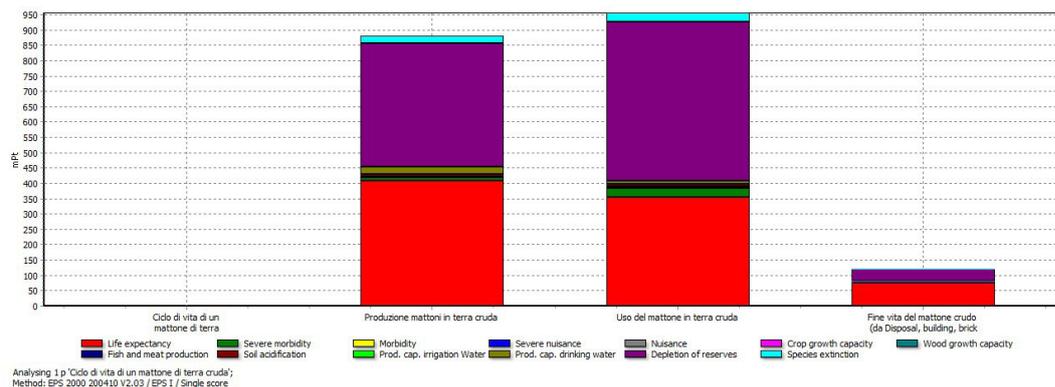


Figura 7.2: Diagramma dell'analisi dei costi esterni del Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con EPS

Simapro 7.3 Impact assessment Date: 26/11/2013 Time: 12.58
 Project Mattone Terra Cruda

Calculation:	Analyse
Results:	Impact assessment
Product:	1 p Ciclo di vita di un mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)
Method:	EPS 2000 200410 V2.03 / EPS I
Indicator:	Single score
Unit:	mPt
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	Yes
Sorted on item:	Impact category
Sort order:	Ascending

(a) Dati generali

Impact category	Unit	Total	Ciclo di vita di un mattone di terra cruda	Produzione mattoni in terra cruda	Uso del mattone in terra cruda	Fine vita del mattone crudo (da Disposi, building, brick, to sorting plant/CH U)
Total	Pt	1,9548664716	0	0,8801654663	0,9552219045	0,1194791007
Life expectancy	Pt	0,8345054437	0	0,4065739969	0,3541363688	0,073795078
Severe morbidity	Pt	0,0448212291	0	0,0114841008	0,0293680999	0,0039690284
Morbidity	Pt	0,0101276464	0	0,003024485	0,0062673302	0,0008358313
Severe nuisance	Pt	0,003823222	0	0,0015420585	0,002146939	0,0001342245
Nuisance	Pt	0,0077324134	0	0,0035677175	0,0034272243	0,0007374715
Crop growth capacity	Pt	0,0001039589	0	0,00003656	5,487981716E-005	1,251912987E-005
Wood growth capacity	Pt	-0,000289328	0	-8,59624453E-005	-0,0001748598	-2,85057349E-005
Fish and meat production	Pt	-2,56215079E-005	0	-9,65441149E-006	-1,24519263E-005	-3,51517008E-006
Soil acidification	Pt	1,166125438E-005	0	4,396106921E-006	0,000005894	1,371177992E-006
Prod. cap. irrigation Water	Pt	0,0038057987	0	0,002592093	0,0011011499	0,0001125558
Prod. cap. drinking water	Pt	0,0380579873	0	0,0259209305	0,0110114992	0,0011255577
Depletion of reserves	Pt	0,9599480692	0	0,4017058795	0,5196692252	0,0385729646
Species extinction	Pt	0,052243991	0	0,0238088655	0,0282206059	0,0002145197

(b) Tabella valori

Figura 7.3: La valutazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo con EPS

7.2 Calcolo del processo Ciclo di vita di un mattone crudo con Eco-indicator 99

Per potere avere un'ulteriore valutazione monetaria del danno, si è scelto di convertire in euro il danno calcolato con la caratterizzazione di Eco-indicator99 (mo-

dificato), attraverso le seguenti operazioni:

1. per convertire il danno nella categoria **Human health** si assume che un anno di vita perso dall'intera popolazione europea (1 DALY) generi un costo esterno pari allo stipendio lordo annuo di un cittadino medio europeo, stimato in 31150 €. In questo caso il criterio usato per il calcolo del costo esterno tiene conto della perdita che il PIL europeo subisce per effetto della perdita del lavoro di un cittadino europeo. Il costo vale: 31150 €/(DALY);
2. la stima economica del danno per la categoria **Ecosystem Quality** è stata effettuata in base al costo della reintroduzione di una specie animale nell'ambiente. In particolare è stato preso a titolo di esempio il ripristino del nibbio nel parco di Frasassi. Per ripristinare tale specie è necessaria una spesa di 61974,83 €/anno. Inoltre si sono ottenute informazioni riguardanti il ripristino del camoscio di Abruzzo (145000 €/anno per la creazione di una popolazione sui monti Sibillini, 145000 €/anno per la creazione di una popolazione sul Sirente Velino, 120000 €/anno per studi genetici, 170000 €/anno per la cattura e radio localizzazione, 20000 €/anno per spese varie per un totale di 600000 €/anno) e del pollo Sultano in Sicilia e Sardegna (200000 €/anno per la creazione reintroduzione, 100000 €/anno per il monitoraggio e la ricerca, 1400000 €/anno per il ripristino ambientale, 2250000 €/anno per la creazione di una zona umida, per un totale di 3950000 €/anno). Si può fare una media aritmetica delle spese sostenute per il ripristino di tre specie europee che consideriamo e attribuire tale valore al costo per il ripristino di una qualsiasi specie europea C_{ripr} :

$$C_{ripr} = (61974,83 + 600000 + 3950000)/3 = 1537325[\text{€/specie}]$$

Il Metodo Eco-indicator 99 calcola nella categoria di danno **Ecosystem Quality** il valore dei $PDFm2yr$ che rappresentano l'incremento della percentuale della frazione di specie scomparse in Europa (rapporto tra il numero di specie a rischio e il numero di specie totali). Le specie esistenti sul territorio europeo sono 215000, di cui il 24% sono a rischio (affected). Pertanto considerando che la superficie europea è pari a $2,16E+12$ m² e che per ripristinare una specie occorre farlo in 3 zone, è possibile calcolare economicamente il danno associato alla qualità dell'ecosistema seguendo il seguente procedimento:

- Percentuale delle specie "disappeared" rispetto al numero totale delle specie:

$$PDFm2yr / (2,16 \times 10^{12} m2yr) = PDF$$

- Numero di specie disappeared = NSD
- si va a ricavare

$$PDF = (NSD / \text{Numerodispecietotale}) \times 100 = (NSD / 215000) \times 100$$

da cui si ottiene

$$NSD = PDF \times 215000 / 100 = PDF \times 2150$$

- Costo per il reintegro delle specie scomparse a causa del danno pari a $PDFm2yr$:

$$\begin{aligned}
 15377325[€] \times 3[zone] \times NSD &= 1537325[€] \times 3[zone] \times PDF \times 2150 \\
 &= 1537325[€] \times 3 \times 2150 \times \frac{PDFm2yr}{2,16 \times 10^{12}m2yr} \\
 &= 4,5906 \times 10^{-3}[PDFm2yr]
 \end{aligned}$$

Il coefficiente di costo vale: $4,5906 \times 10^{-3}€/PDFm2yr$.

3. La stima economica del danno per la categoria **Resources** viene effettuata considerando per il MJ surplus l'attuale costo medio europeo di un kWh elettrico, cioè $0,075 €/\text{kWh} = 0,075€ / 3,6\text{MJ} = 0,0208 €/\text{MJ}$. Il coefficiente di costo vale: $0,0208 €/\text{MJ}$.

Per poter confrontare i risultati con quelli ottenuti da EPS 2000, è necessario modificare questi ultimi per tenere conto che essi sono riferiti all'anno 2000 e che esprimono la disponibilità a pagare da parte dell'intero pianeta. I valori in ELU sono stati attualizzati adottando un tasso del 2,5% annuo, quale media negli ultimi 7 anni del tasso netto di rendimento dei titoli free-risk (fattore d'attualizzazione pari a 1,025) e si è effettuata una proporzione per tenere conto della disponibilità a pagare della sola comunità europea: per ogni categoria di danno, si è diviso il valore in ELU per la popolazione mondiale (\times abitanti) e si è poi moltiplicato per la popolazione europea (abitanti). Per il calcolo è stato usato il Metodo Eco-indicator 99 2.05 modificato nella versione Eco-indicator 99 (E) 061010 costi esterni V2.05 / Europe EI 99 E/EI

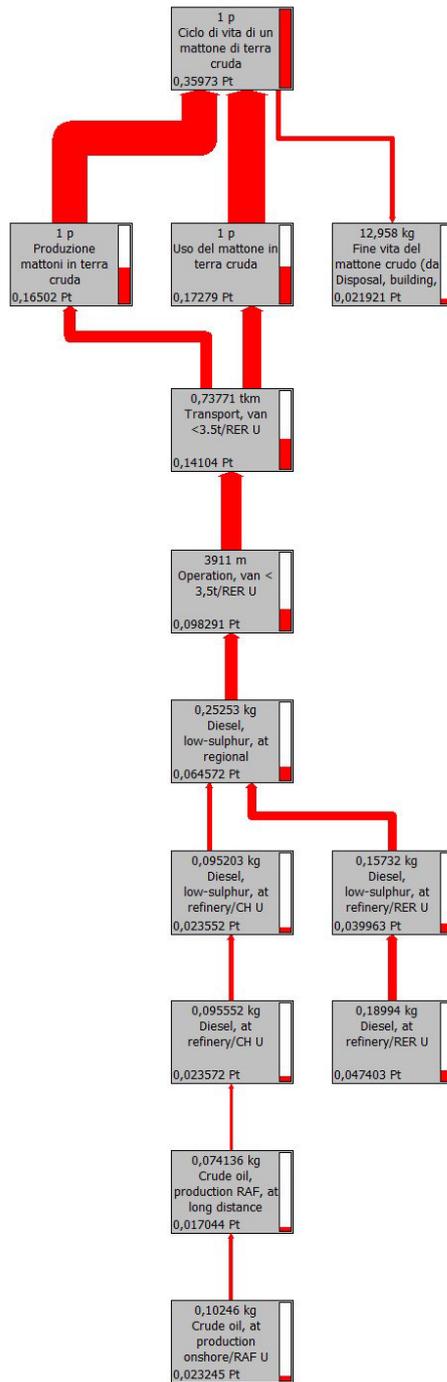


Figura 7.4: Network del processo Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con Eco-indicator 99

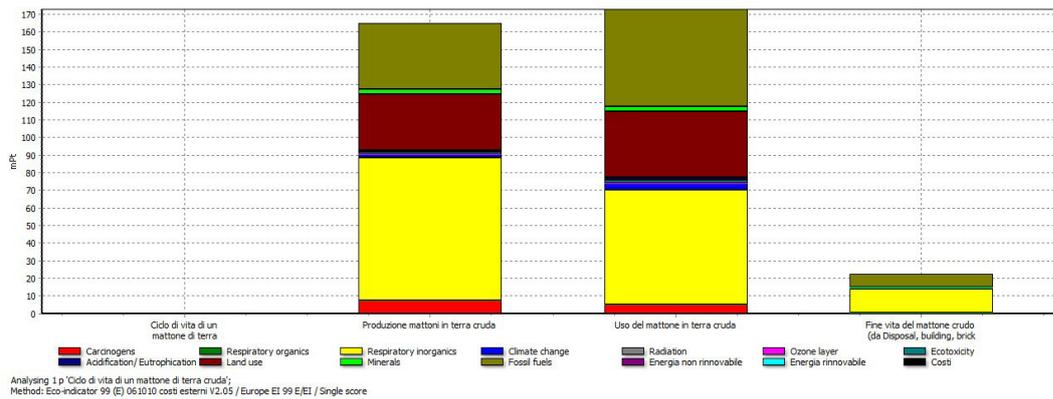


Figura 7.5: Diagramma dell'analisi dei costi esterni del Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con Eco-indicator 99

SimaPro 7.3 Project	Impact assessment Mattone Terra Cruda	Date: 03/12/2013 Time: 17.27
Calculation:	Analyse	
Results:	Impact assessment	
Product:	1 p Ciclo di vita di un mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)	
Method:	Eco-indicator 99 (E) 061010 costi esterni V2.05 / Europe EI 99 E/EI	
Indicator:	Single score	
Unit:	mPt	
Skip categories:	Never	
Exclude infrastructure processes:	No	
Exclude long-term emissions:	No	
Per impact category:	Yes	
Sorted on item:	Impact category	
Sort order:	Ascending	

(a) Dati generali

Impact category	Unit	Total	Ciclo di vita di un mattone di terra cruda	Produzione mattoni in terra cruda	Uso del mattone in terra cruda	Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)
Total	Pt	0,3597316	0	0,1650227322	0,1727880663	0,0219208111
Carcinogens	Pt	0,0124783	0	0,0073164672	0,0048024553	0,0003593379
Respiratory organics	Pt	6,46E-005	0	2,413855649E-005	3,587558664E-005	4,604350075E-006
Respiratory inorganics	Pt	0,159698	0	0,081195013	0,0651974899	0,0133054953
Climate change	Pt	0,0060957	0	0,0016837699	0,0039158196	0,0004961057
Radiation	Pt	0,0001644	0	6,158873419E-005	8,310231891E-005	1,968275178E-005
Ozone layer	Pt	4,96E-006	0	1,852788678E-006	2,750832383E-006	3,532971906E-007
Ecotoxicity	Pt	0,0033687	0	0,0013546812	0,0018394314	0,0001745609
Acidification/ Eutrophication	Pt	0,0029339	0	0,0010977878	0,0014408521	0,0003952703
Land use	Pt	0,0685875	0	0,0315726053	0,0372301375	-0,0002152845
Minerals	Pt	0,0063567	0	0,0030433848	0,0031131169	0,0002001759
Fossil fuels	Pt	0,099979	0	0,037671443	0,0551270349	0,0071805092
Energia non rinnovabile	Pt	0	0	0	0	0
Energia rinnovabile	Pt	0	0	0	0	0
Costi	Pt	0	0	0	0	0

(b) Tabella valori

Figura 7.6: La valutazione del processo Ciclo di vita di un mattone crudo con Eco indicator 99

SimaPro 7.3 Impact assessment Date: 26/11/2013 Time: 13.24
 Project Mattone Terra Cruda

Calculation:	Analyse
Results:	Impact assessment
Product:	1 p Ciclo di vita di un mattone di terra cruda (of project Mattone Terra Cruda)
Method:	Eco-indicator 99 (E) 061010 costi esterni V2.05 / Europe EI 99 E/EI
Indicator:	Damage assessment
Unit:	%
Skip categories:	Never
Exclude infrastructure processes:	No
Exclude long-term emissions:	No
Per impact category:	No
Sorted on item:	Damage category
Sort order:	Ascending

Damage category	Unit	Total	Ciclo di vita di un mattone di terra cruda	Produzione mattoni in terra cruda	Uso del mattone in terra cruda	Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)
Human Health	€	0,2578267899	0	0,1304009106	0,1069367958	0,0204890835
Ecosystem Quality	€	0,0052890857	0	0,0024030102	0,0028610358	2,5039748032E-005
Resources	€	0,0394961435	0	0,0151226654	0,021632078	0,0027414001
Energia non rinnovabile	MJ	26,7673742304	0	10,0827959853	14,600157993	2,0844202522
Energia rinnovabile	MJ	3,7012474104	0	3,2331820018	0,3826131986	0,0854522099
Costi	€	0,95	0	0,95	0	0

Figura 7.7: Analisi dei costi esterni del Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con Eco-indicator 99

7.3 I costi esterni e i costi interni

In tabella sono riportati sinteticamente i risultati dell'analisi dei costi esterni ottenuti coi due metodi e i costi interni.

	Human healt	Ecosystem production capacity	Abiotic stock resources	Biodiversity	Totale
EPS	0,90101	0,04166	0,95995	0,0522440	1,9549
Eco-indicator 99	0,25783		0,039496	0,0052891	0,3026151
Costo interno					0,95

Tabella 7.1: I costi esterni e i costi interni del mattone

I risultati relativi ai costi esterni ottenuti con due metodi diversi, uno creato dalla Svezia (EPS) e l'altro ricavato da un metodo olandese modificato da un gruppo di studio LCA dell'ENEA per introdurre i costi esterni sono diversi, come era naturale attendersi. Tuttavia sono dello stesso ordine di grandezza. Il costo interno è situato internamente alla forchetta dei valori dei costi esterni. Nella maggior parte dei casi studio effettuati si è trovato che il costo interno ha lo stesso ordine di grandezza del costo esterno. Questo risultato sembra mostrare una correlazione stretta tra costi ambientali e costi economici. Tale correlazione è evidente nel caso dell'energia. Essa rappresenta una parte preponderante sia del danno ambientale che del costo di produzione che a sua volta determina il costo interno.

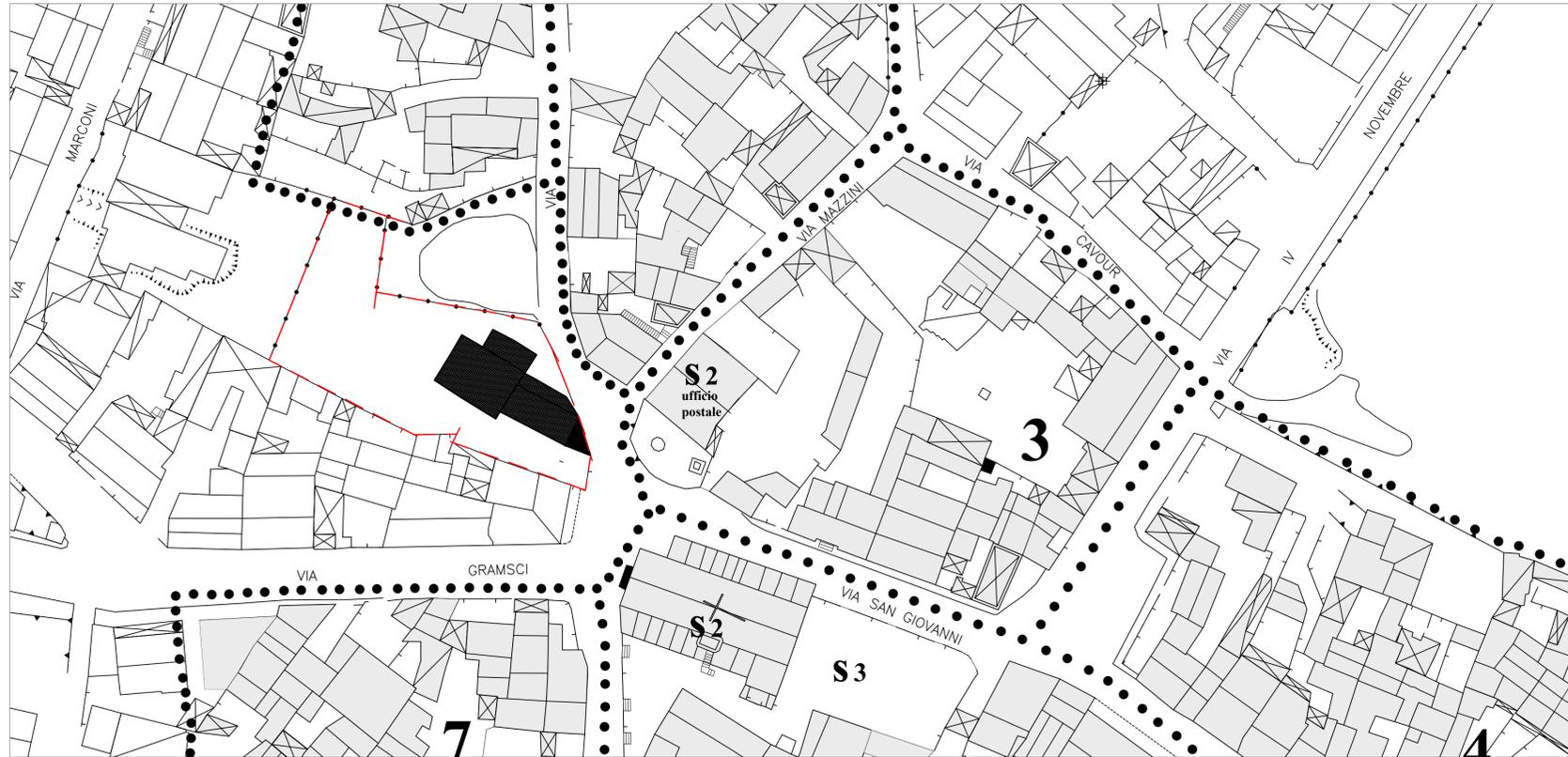
Conclusioni generali

Dallo studio effettuato si possono trarre le seguenti conclusioni:

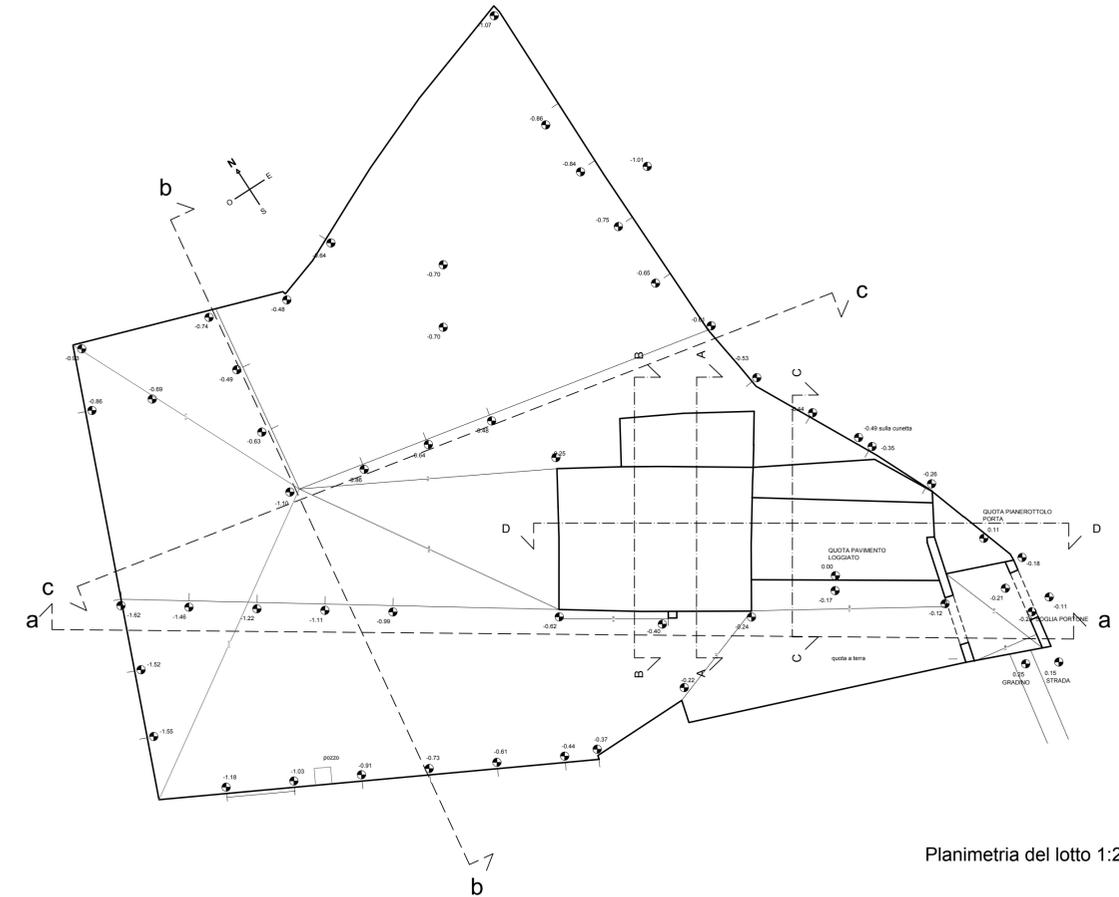
- nel ciclo di vita del mattone crudo il danno ambientale dipende soprattutto dalle emissioni che sono state stimate avvenire durante la produzione e durante l'uso;
- dal confronto tra una parete portante per una casa di due piani in mattoni di terra cruda e in laterizio risulta che il danno ambientale è maggiore per la parete in laterizio. Tale differenza è dovuta principalmente al trasporto del laterizio dal luogo di produzione a quello di uso e alla cottura dello stesso. Ciò nonostante la resistenza a compressione del mattone in terra cruda sia dieci volte inferiore (1-3MPa contro 10-55MPa) e quindi lo spessore minimo della parete in mattoni di terra cruda sia di 40cm mentre quella in laterizio sia di 30cm. E nonostante la conducibilità termica del mattone in terra cruda sia superiore a quella del laterizio;
- il costo esterno del mattone in terra cruda è dello stesso ordine di grandezza del costo interno.

E' da evidenziare il fatto che i risultati ottenuti non tengono conto di alcuni aspetti a vantaggio della terra cruda. Innanzitutto i mattoni possono essere realizzati in cantiere con la terra ricavata dagli scavi realizzati per le fondazioni, eliminando quindi il trasporto dei mattoni dal sito di produzione degli stessi. Inoltre nel calcolo della energia necessaria alla climatizzazione degli ambienti nell'ambito del processo 1m² di parete in mattoni crudi non si è tenuto conto delle ottime caratteristiche dal punto di vista igrometrico della terra cruda. Si può dire allora che, se da un lato la terra cruda al momento sembra non avere le caratteristiche da un punto di vista strutturale per la realizzazione di edifici di grandi dimensioni, certamente dall'altro rappresenta una scelta meno impattante dal punto di vista ambientale, e quindi da preferirsi, per l'autocostruzione, la realizzazione di edifici di piccole dimensioni o talvolta per la realizzazione di elementi non portanti all'interno di grandi edifici. In conclusione, risulta evidente come la tecnologia delle costruzioni in terra cruda possa definirsi a tutti gli effetti una tecnologia *site specific*.

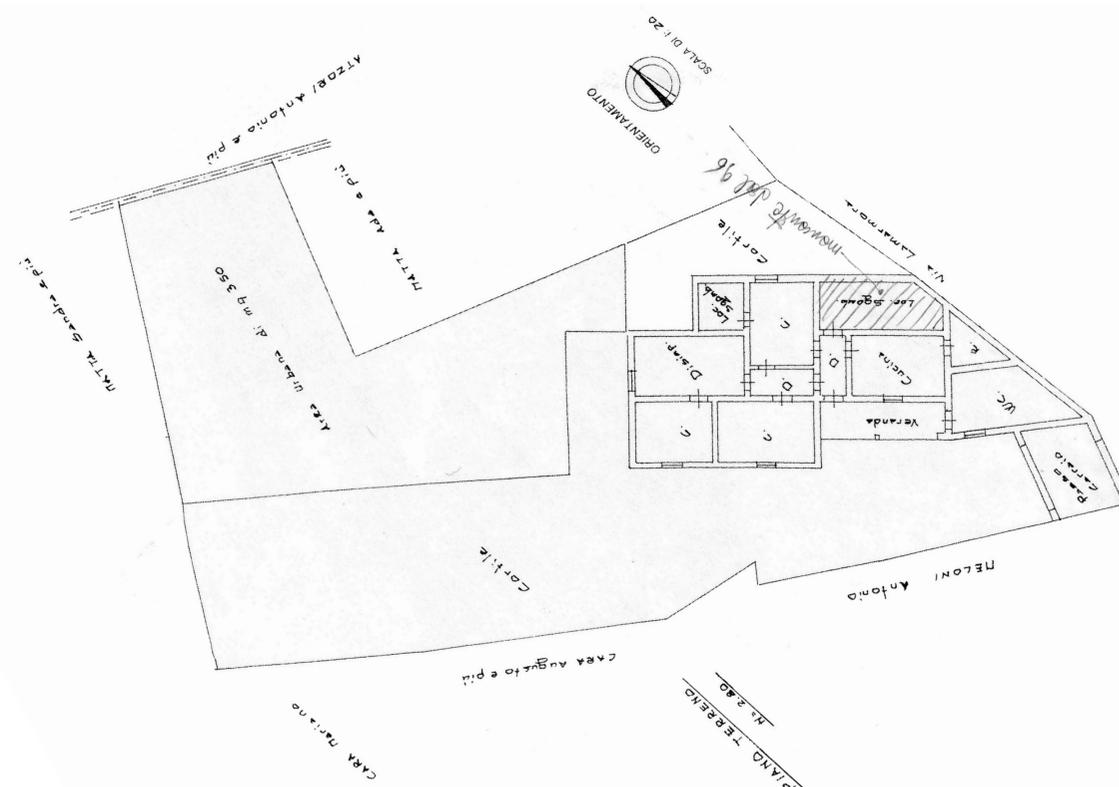
Allegati



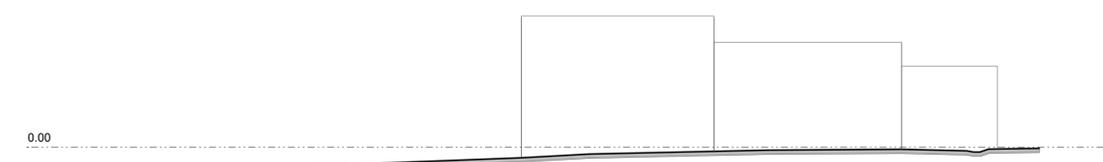
Inquadramento 1:500



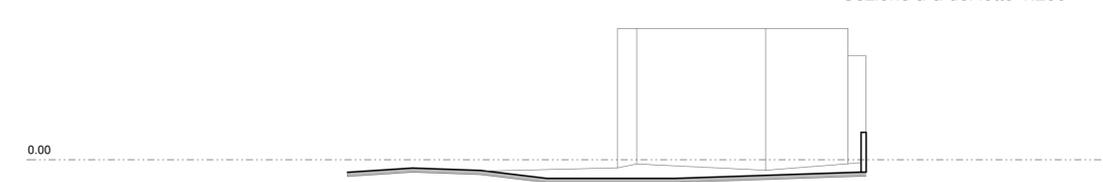
Planimetria del lotto 1:200



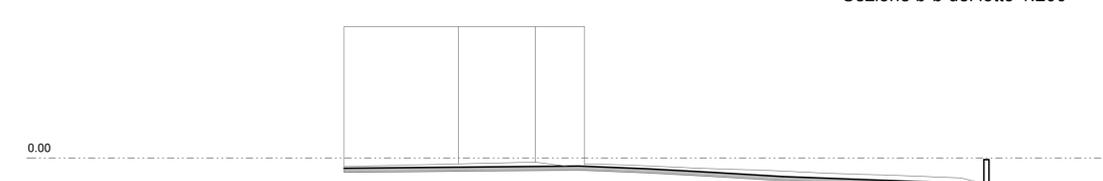
Planimetria catastale 1:200



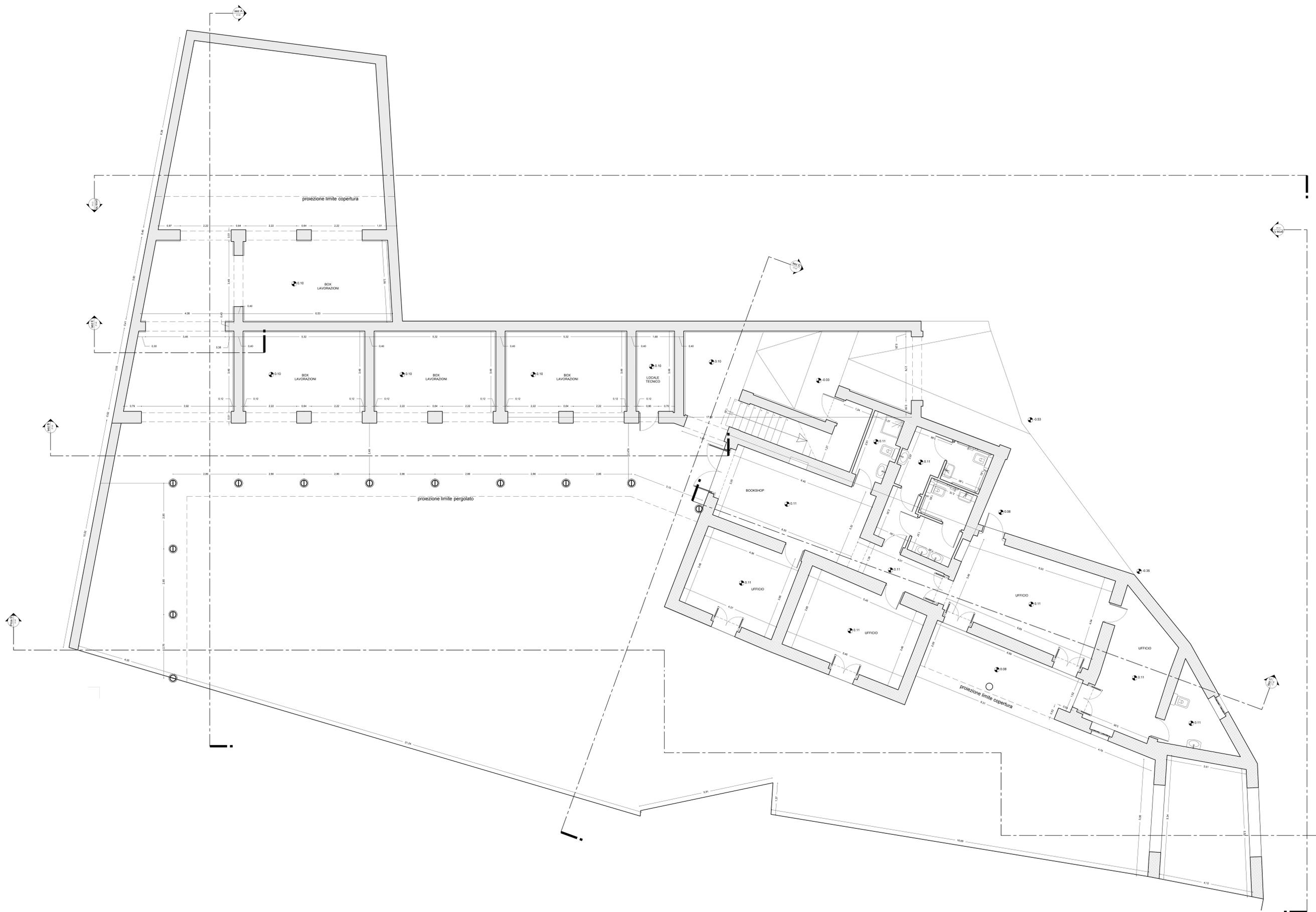
Sezione a-a del lotto 1:200



Sezione b-b del lotto 1:200



Sezione c-c del lotto 1:200



COMUNE DI PABILLONIS
 Provincia del Medio Campidano
 P.O.R. Sardegna 2000-2006, Asse V misura 5.1
 Politiche per le Aree Urbane "Bando Città" "Rafforzamento Centri Minori"
 Progetto pilota "ITINERARI DELLA TERRA"
**PROGETTO DI RECUPERO DI UN EDIFICIO IN TERRA CRUDA
 E DI REALIZZAZIONE NEGLI SPAZI DI PERTINENZA
 DI UN LABORATORIO DELL'ARGILLA CRUDA E COTTA**

Il Sindaco
 Marco Dessì
L'Assessore ai Lavori Pubblici
 Alessandro Garau

Responsabile del procedimento
 Ing. Stefano Cadeddu
ARCHITETTURA E RESTAURO
 Progettati incaricati:
 Associazione Temporanea di Professionisti
 Arch. Alceo Vado (coordinatore)

Collaboratori
 Ing. Pierluigi Agneta
 Ing. Roberto Lippi
 Ing. Gianni M. Murenu
 Geom. Giuseppe Pilo
CALCOLI STRUTTURALI
 Ing. Giuseppe Mura

IMPIANTI TECNICI
 Ing. Ignazio Spiga

COORDINAMENTO PER LA SICUREZZA
 Ing. Antonio Sola

PROGETTO ESECUTIVO - AGGIORNAMENTO

sezione **PROGETTO**
 TAVOLE ARCHITETTONICHE

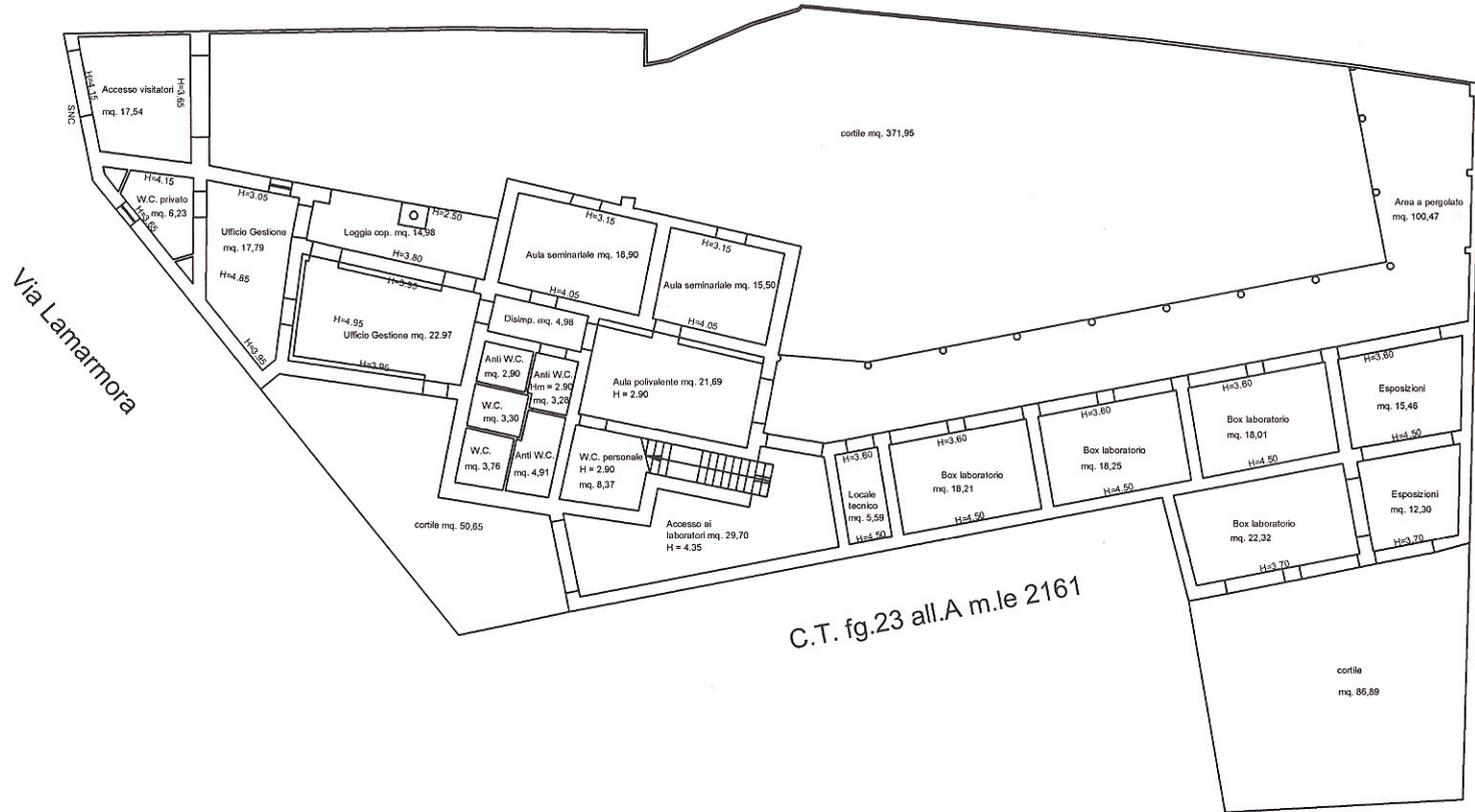
tavola **C.1.a.1**

Pianta piano terra

PIANO TERRA

C.T. fg.23 all.A m.le 2093

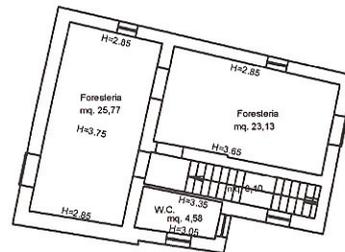
C.T. fg.23 all.A m.le 4422



C.T. fg.23 all.A m.le 4319

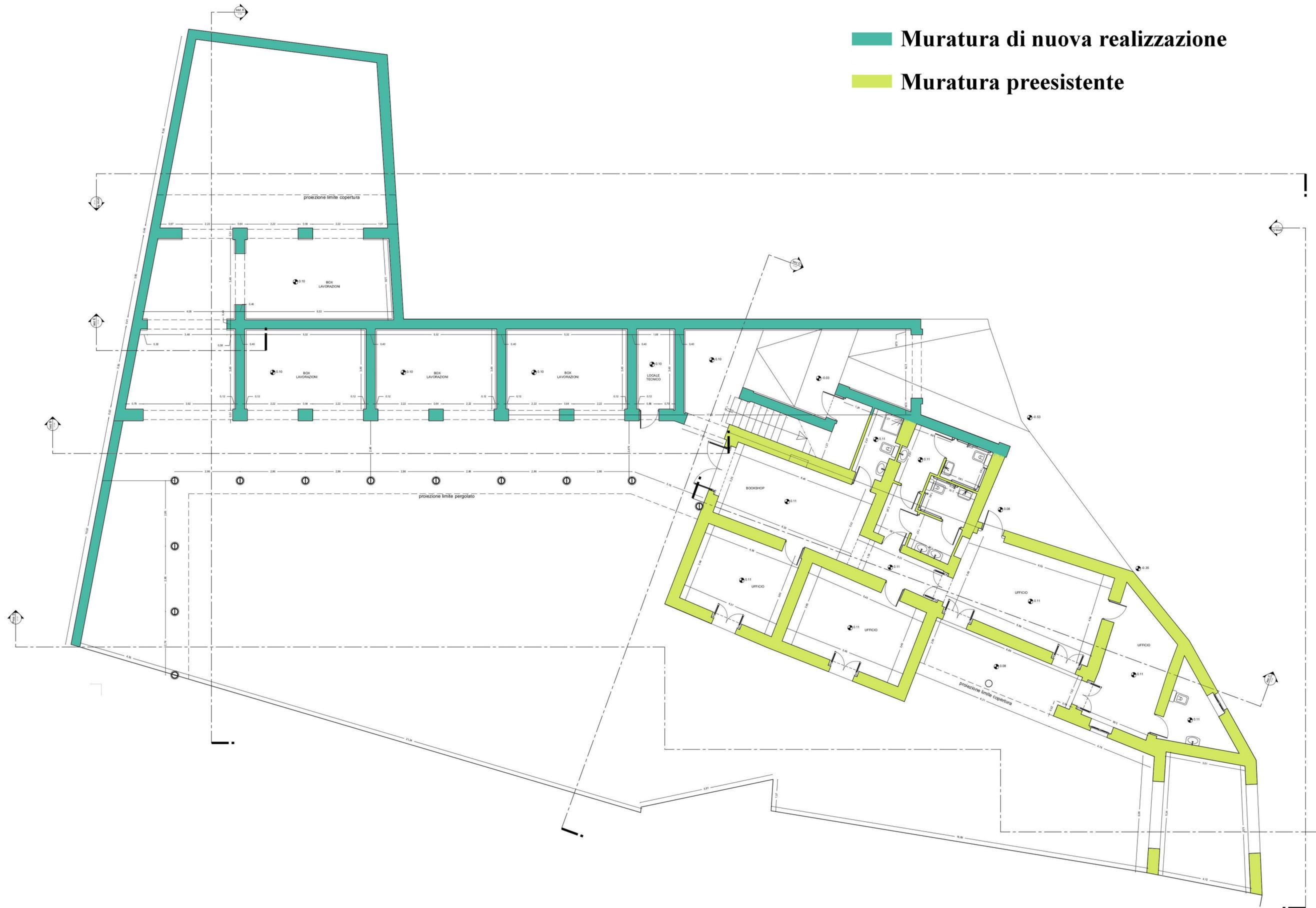
C.T. fg.23 all.A m.le 4330

PIANO PRIMO



Muratura di nuova realizzazione

Muratura preesistente



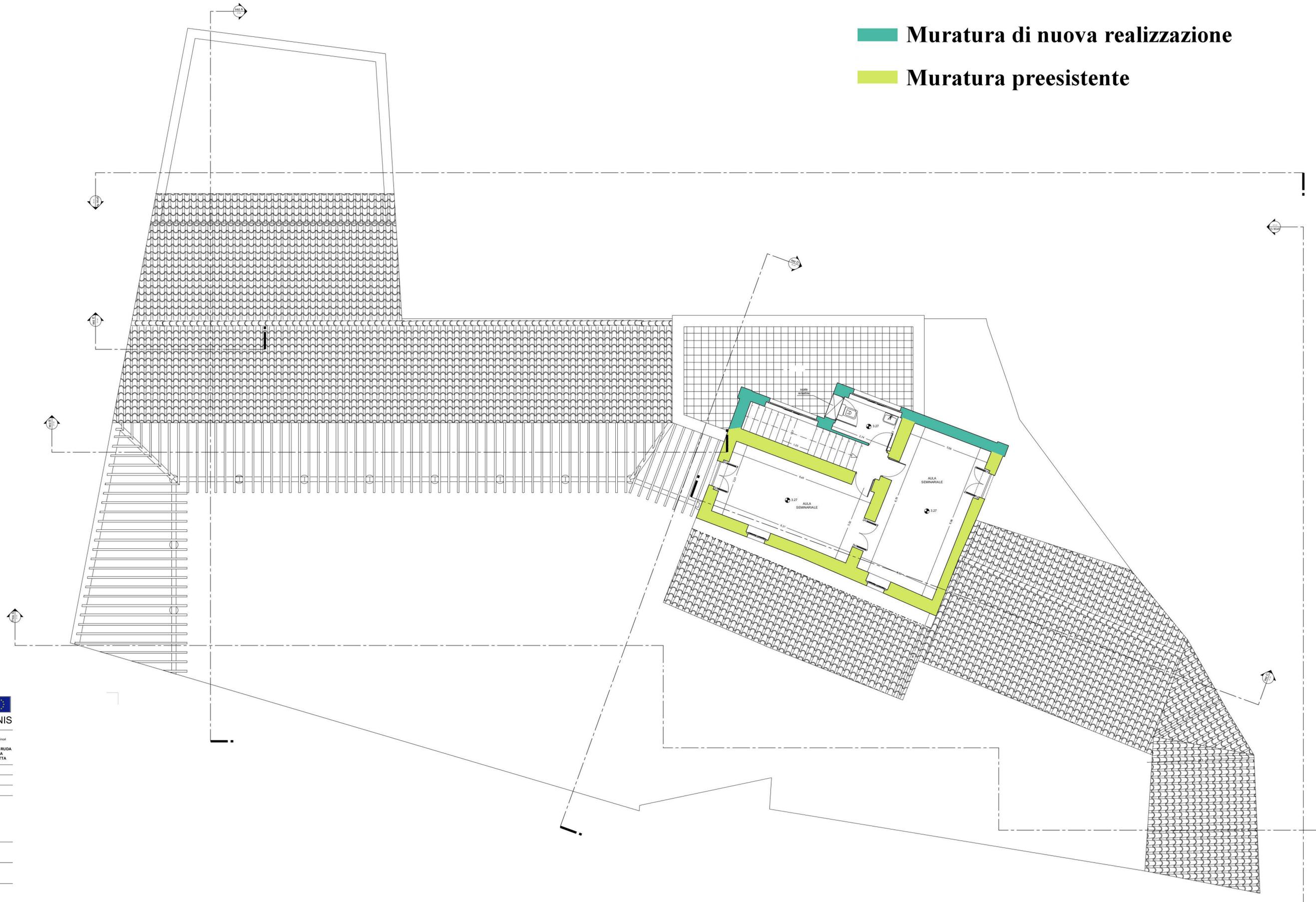
COMUNE DI PABILLONIS
Provincia del Medio Campidano
POR Sardegna 2000-2006 Area V misura 5.1
Pubblica per la Area Urbana "Bando Casa" Subordinamento Carri Minioli
Progetto pilota "ITINERARI DELLA TERRA"
**PROGETTO DI RECUPERO DI UN EDIFICIO IN TERRA CRUDA
E DI REALIZZAZIONE NEGLI SPAZI DI PERTINENZA
DI UN LABORATORIO DELL'ARGILLA CRUDA E COTTA**

Il Sindaco
Michele Dessì
L'Assessore ai Lavori Pubblici
Alessandro Clivio
Responsabile del procedimento
Ing. Stefano Cadeddu
ARCHITETTURA E RESTAURO
Progetto ideato da:
Associazione Temporanea di Professionisti
Arch. Alice Vado (responsabile)
Ing. Alessio Bellu
Ing. Giuseppe Musu
Ing. Ignazio Spiga
Ing. Massimo Mura
Ing. Antonio Fadda
Collaboratori
Ing. Riccardo Agnelli
Ing. Roberto Logu
Ing. Giorgio M. Murru
Ing. Giovanni Pini
CALCOLO STRUTTURALE
Ing. Giuseppe Musu
IMPIANTI TECNICI
Ing. Ignazio Spiga
COORDINAMENTO PER LA SICUREZZA
Ing. Alessio Bellu

PROGETTO ESECUTIVO - AGGIORNAMENTO
edizione
PROGETTO
TAVOLE ARCHITETTONICHE
serie
C.1.a.1
Pianta piano terra

Muratura di nuova realizzazione

Muratura preesistente



COMUNE DI PABILLONIS
Provincia del Medio Campidano

POR Sardegna 2000-2006, Assa V misura 5.1
Politiche per le Aree Urbane "Bando Città" Rafforzamento Centro Mirati
Progetto pilota "ITINERARI DELLA TERRA"
**PROGETTO DI RECUPERO DI UN EDIFICIO IN TERRA CRUDA
E DI REALIZZAZIONE NEGLI SPAZI DI PERTINENZA
DI UN LABORATORIO DELL'ARGILLA CRUDA E COTTA**

Il Sindaco
Marco D'Amico

L'Assessore ai Lavori Pubblici
Alessandro Caba

Responsabile del procedimento
Ing. Stefano Cadeddu

ARCHITETTURA E RESTAURO
Progetto incaricati:
Associazione Temporanea di Professionisti
Arch. **Aleco Vado** (coordinatore)

Ing. Alessio Belli
Ing. Giuseppe Musu
Ing. Ignazio Spiga
Ing. Massimo Mada
Ing. Antonio F. Adda

Collaboratori
Ing. Pierpaolo Agnelli
Ing. Roberto Ligu
Ing. Sergio A. Murtas
Dott. Giuseppe Re

CALCOLI STRUTTURALI
Ing. Giuseppe Musu

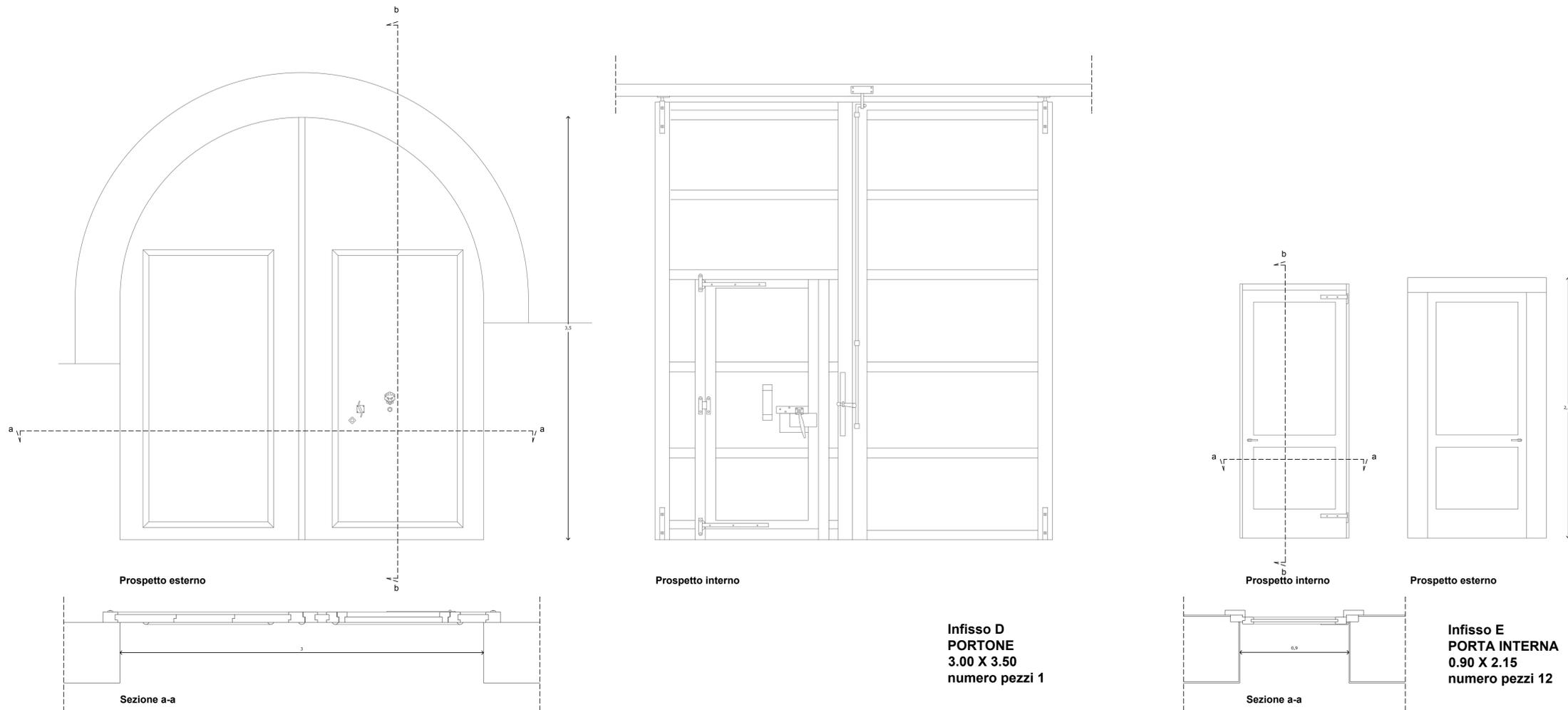
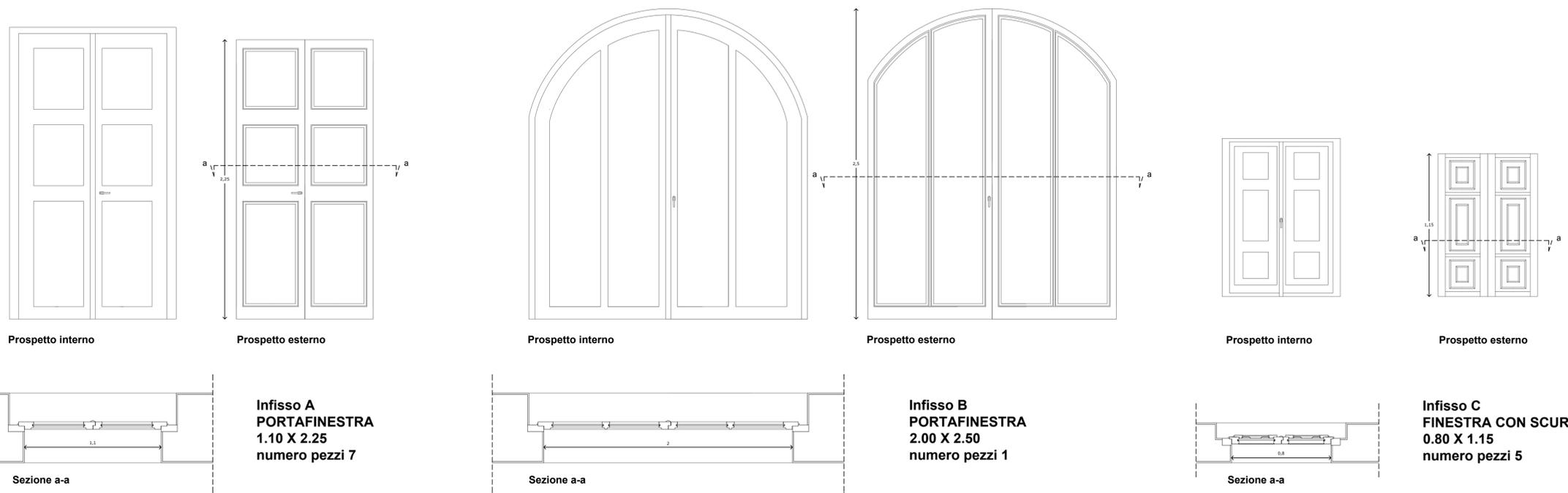
IMPIANTI TECNICI
Ing. Ignazio Spiga

COORDINAMENTO PER LA SICUREZZA
Ing. Alessio Belli

PROGETTO ESECUTIVO - AGGIORNAMENTO
sezione **PROGETTO**
TAVOLE ARCHITETTONICHE

tabella **C.1.a.2**

Pianta piano primo



Bibliografia

- [1] Materiale sul sito it.wikipedia.org
- [2] Materiale sul sito en.wikipedia.org
- [3] *Dichiarazione Universale dell'UNESCO sulla Diversità Culturale* (2001), Parigi.
- [4] Sanna A, Atzeni C (2006) *Architettura in terra cruda - dei Campidani del Cixerri e del Sarrabus*, Itaca, Cagliari.
- [5] Hall M, Lindsay R, Krayenhoff M (2012) *Modern earth buildings - Materials, engineering, constructions and applications*, Woodhead Publishing, Cambridge.
- [6] Minke, Gernot (2006) *Building with Earth*, Birkhauser, Basilea.
- [7] Minke, Gernot (2001) *Manual de construcción en tierra - La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*, EcoHabitar - Rif. a sezioni specifiche tradotte in italiano dall'architetto Alceo Vado, e gentilmente messe a disposizione -.
- [8] Achenza M , Sanna U (2006) *Il Manuale Tematico della Terra Cruda*, Itaca, Cagliari.
- [9] Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F (1979) *Construire en Terre*, CRATerre.
- [10] Scudo G, Narici B, Talamo C (2001) *Costruire con la terra*, Sistemi Editoriali, Pozzuoli.
- [11] Gandreau D, Delboy L (2012) *Inventory of earthen architecture*, CRATerre-ENSAG.
- [12] Reardon C, Milne G, McGee C, Downton P (2010) *yourHome- Technical manual - 4th edition*.
- [13] *Progetto terra cruda - studio di fattibilità* (2006), Cres, Cagliari.

- [14] Sito web www.terracruda.org
- [15] Sito web www.earthbuilding.org.nz
- [16] Sito web www.ebaa.asn.au
- [17] Sito web www.eartharchitecture.org
- [18] Sito web www.casediterra.it
- [19] Sito web craterre.org
- [20] Sito web www.comune.pabillonis.vs.it
- [21] Sito web www.lehmtonerde.at
- [22] Sito web www.gernotminke.de
- [23] Sito web www.bioarch.tv
- [24] Sito web www.officinepolieri.com
- [25] Sito web www.laterizivalpescara.it
- [26] Documento al link: www.geoindustrie.com/murature
- [27] D.M. 14-01-2008 *Norme tecniche per le costruzioni*
- [28] Documento al link: www.gruppovela.com/uploads/downloads/secondo
- [29] Sito web www.sanzioniamministrative.it/collegamenti/Testi/Tabelle
- [30] Lavagna, Monica (2008) *Life Cycle Assessment in edilizia*, Hoepli
- [31] Neri, Paolo (2009) *L'analisi ambientale dei prodotti agroalimentari con il metodo del Life Cycle Assessment*, Arpa Strumenti
- [32] Neri, Paolo (2007) *Verso la valutazione ambientale degli edifici*, Alinea Editrice S.r.l.
- [33] Rizzo, Sara (2013) *Il risparmio delle risorse alla scala abitativa e di insediamento. Tecnologie non convenzionali e valutazione ambientale attraverso metodologia LCA*, Tesi di dottorato, Bologna.
- [34] Peroni, Davide (2011) *Analisi LCA delle case di paglia di Pescomaggiore (AQ)*, Tesi di laurea, Bologna.
- [35] Goedkoop M ed altri (2010) *Introduction to LCA with SimaPro 7*, PRé Consultants.
- [36] Goedkoop M ed altri (2010) *SimaPro 7 Tutorial*, PRé Consultants.
- [37] Mattone, Roberto *La terra cruda, tra tradizione e innovazione*

- [38] Slide del corso di Valorizzazione delle Risorse Primarie e Secondarie a.a. 2012/2013
- [39] Pevsner N, Fleming J e Honour H (1966) *Dizionario di architettura*, Einaudi, Torino, Voce “Opus”.

Elenco delle figure

1.1	Miglioramento qualità dell'acqua - (a) Fonte: flickr.com (b) Fonte: blogs.smithsonianmag.com (c) Fonte: theenergylibrary.com	10
1.2	Tecnologie per l'approvvigionamento d'acqua - (a) Fonte: cissong.org (b) Fonte: ipsnews.net (c) Fonte: news.nationalgeographic.com (d) Fonte: inhabitat.com	11
1.3	Il sistema composting toilet - (a) Fonte: allotmentssouthwest.org.uk (b) Fonte: randolphmountainclub.org	12
1.4	Tecnologia appropriate per la produzione di energia - (a) Fonte: solsticeips.com (b) Fonte: alivegreenpower.com	13
1.5	Una bicicletta con telaio in bamboo - Fonte: treehugger.com	13
1.6	Macchina portatile per l'elettrocardiogramma prodotta da GE - Fonte: forbesindia.com	14
1.7	Il primo netbook prodotto da Asus - Fonte: notebookitalia.it	15
1.8	Le banconote utilizzate nel sistema arcipelago Scec - Fonte: ilcambiamento.it	15
1.9	Tecnologie appropriate per l'alimentazione - (a) Fonte: motherearthnews.com (b) Fonte: pedav.gov.in (c) Fonte: practicalaction.org	16
2.1	Strutture a volta nel sito di Gournà - Fonte: Strutture a volta nel sito di Gournà	18
2.2	La Piramide del Sole in Messico - Fonte: it.wikipedia.org	18
2.3	Abitazioni in terra cruda a Heuneburg - Fonte: it.wikipedia.org	19
2.4	Abitazione progettata da Martin Rauch realizzata in Pisè - Fonte: bestarchitects.de	20
2.5	Centro progettato da Martin Rauch con pannelli in terra cruda - Fonte: earth-auroville.com	21
2.6	Tecniche di costruzione in terra cruda - Fonte [19]	24
2.7	Formazione dell'adobe nello stampo - Fonte: reteimprese.it	25
2.8	Mattoni in terra cruda durante l'essiccamento - Fonte: cityfactor.it	26
2.9	Allettamento di muratura in adobe - Fonte: casaenergia.net	26
2.10	Vecchia abitazione in adobe presente in Sardegna - Fonte: provincia.mediocampidano.it	27

2.11	Realizzazione di una muratura in Pisè - Fonte: bio-ecological.com	29
2.12	Muratura in pisè - Fonte: matteobrioni.it	29
2.13	Messa in opera di una muratura eseguita con la tecnica Torchis - Fonte: empreinte.asso.fr	30
2.14	Una pressa per la realizzazione di mattoni in terra compressa - Fonte: harambee-onlus.it	31
2.15	Mattoni in terra compressa in uscita dalla pressa - Fonte: bandera- snews.com	31
2.16	Una parete realizzata in mattoni di terra compressa - Fonte: thee- meraldhomesantafe.com	32
2.17	La tecnica Bauges - (a) Fonte: it.wikipedia.org (b) Fonte: flickri- ver.com	33
2.18	Costruzione in terra cruda tipica dell'Abruzzo - Fonte: conosce- re.abruzzoturismo.it	33
2.19	Muratura in terra-paglia - (a) Fonte: solarhaven.org (b)	34
3.1	Lo stato dell'immobile al momento dell'acquisto - Esterni - Foto arch. Alceo Vado - in Dossier illustrativo documentale per il Comune di Pabillonis	37
3.2	Lo stato dell'immobile al momento dell'acquisto - Interni - Foto arch. Alceo Vado - in Dossier illustrativo documentale per il Comune di Pabillonis	38
3.3	Vista di parte dell'edificio a seguito di alcuni crolli e demolizioni - Foto per gentile concessione del Geom. Giancarlo Collu	40
3.4	Particolare delle fondazioni - Disegno autografo gentilmente conces- so dall'arch. Alceo Vado	41
3.5	Scheda riassuntiva dei tipi di drenaggio ventilato per vespai interni - Disegno autografo gentilmente concesso dall'arch. Alceo Vado	42
3.6	Schema della rimozione di elementi ammalorati da una muratura - Fonte [4]	43
3.7	Il mattone in terra cruda realizzato dalla ditta Fratelli Coni	44
3.8	Molazza Officine Polieri modello 200 - Fonte: officinepolieri.com	44
3.9	Particolari realizzativi della tessitura a blocco - Disegni autografi gentilmente concessi dall'arch. Alceo Vado	45
3.10	Particolari realizzativi della tessitura a cassetta - Disegni di proget- to dell'arch. Alceo Vado in dossier documentale per il Comune di Pabillonis	46
3.11	Schema della tessitura a cassetta con riempimento - Disegni di pro- getto dell'arch. Alceo Vado in dossier progettuale per il Comune di Pabillonis	46
3.12	Tessiture murarie - (a) Foto per gentile concessione del Geom. Emi- lio Podda, Il Concio Costruzioni	48
3.13	La vagliatura della terra utilizzata per gli intonaci - Foto per gentile concessione del Geom. Emilio Podda, Il Concio Costruzioni	49
3.14	L'applicazione dell'intonaco in terra stabilizzata - Per gentile con- cessione di Geom. Emilio Podda, Il Concio Costruzioni	51
3.15	La struttura del tetto ventilato - Fonte: agosticoperture.net	52

3.16	Il portone dell'ingresso principale	52
3.17	Sequenza di archi a tutto sesto in terra cruda, realizzati nell'edificio	53
3.18	Il pergolato	53
5.1	Il network del processo <u>Ciclo di vita di un mattone in terra cruda</u> .	79
5.2	Il diagramma della caratterizzazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	80
5.3	La caratterizzazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	80
5.4	Il diagramma del damage assessment del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	83
5.5	Il damage assessment del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	84
5.6	Il diagramma della normalizzazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	85
5.7	La normalizzazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u> .	85
5.8	Il diagramma della valutazione per impact category del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	86
5.9	Il diagramma della valutazione per damage category del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	87
5.10	Il diagramma della valutazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u>	87
5.11	La valutazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo</u> . . .	88
5.12	il diagramma del confronto tra i processi <u>Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U e Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U</u>	88
6.1	Confronto fra due pareti di 1m2 in terra cruda e in laterizio	102
6.2	La valutazione del confronto fra 1m2 di una parete in terra cruda e 1m2 di una parete in laterizio	103
6.3	Diagramma della valutazione del confronto tra la malta di terra e quella cementizia	104
6.4	La valutazione del confronto fra la malta in terra cruda e la malta cementizia	105
7.1	Network del processo <u>Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con EPS</u>	108
7.2	Diagramma dell'analisi dei costi esterni del <u>Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con EPS</u>	109
7.3	La valutazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo con EPS</u>	109
7.4	Network del processo <u>Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con Eco-indicator 99</u>	112
7.5	Diagramma dell'analisi dei costi esterni del <u>Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con Eco-indicator 99</u>	113
7.6	La valutazione del processo <u>Ciclo di vita di un mattone crudo con Eco indicator 99</u>	113
7.7	Analisi dei costi esterni del <u>Ciclo di vita di un mattone di terra cruda con Eco-indicator 99</u>	114

Elenco delle tabelle

5.1	<u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	65
5.2	Materiali del processo <u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	65
5.3	Inputs from nature del processo <u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	66
5.4	Strumenti del processo <u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	66
5.5	Trasporti del processo <u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	67
5.6	Energia del processo <u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	67
5.7	Emissioni del processo <u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	68
5.8	<u>Molazza200</u>	69
5.9	Materiali del processo <u>Molazza200</u>	69
5.10	Lavorazioni del processo <u>Molazza200</u>	70
5.11	Trasporti del processo <u>Molazza200</u>	70
5.12	Trattamento del rifiuto del processo <u>Molazza200</u>	70
5.13	<u>Stampo2.5</u>	71
5.14	Materiali del processo <u>Stampo2.5</u>	71
5.15	Trasporti del processo <u>Stampo2.5</u>	72
5.16	Trattamento del rifiuto del processo <u>Stampo2.5</u>	72
5.17	<u>Uso del mattone in terra cruda</u>	73
5.18	Inputs from nature del processo <u>Uso del mattone in terra cruda</u> . . .	74
5.19	Trasporti del processo <u>Uso del mattone in terra cruda</u>	74
5.20	Emissioni del processo <u>Uso del mattone in terra cruda</u>	75
5.21	<u>Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)</u>	76
5.22	Trattamento del rifiuto del processo <u>Fine vita del mattone crudo (da Disposal, building, brick, to sorting plant/CH U)</u>	77
5.23	<u>Recupero di una cava di argilla</u>	77
5.24	Inputs from nature del processo di trattamento rifiuto <u>Recupero di una cava di argilla</u>	77
6.1	<u>1m2 di parete con mattoni crudi</u>	90
6.2	Lavorazioni del processo <u>1m2 di parete con mattoni crudi</u>	91
6.3	Trasporti del processo <u>1m2 di parete con mattoni crudi</u>	91
6.4	Energia del processo <u>Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	91

6.5	<u>Trattamento rifiuti del processo 1m2 di parete con mattoni crudi</u> . . .	92
6.6	<u>Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda</u> .	92
6.7	<u>Materiali del processo Produzione dei mattoni in terra cruda</u>	92
6.8	<u>Strumenti del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda</u>	93
6.9	<u>Trasporti del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda</u>	93
6.10	<u>Energia del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda</u>	93
6.11	<u>Emissioni del processo Produzione malta per allettare un singolo mattone di terra cruda</u>	94
6.12	<u>1m2 di parete di laterizio</u>	95
6.13	<u>Lavorazioni del processo 1m2 di parete di laterizio</u>	95
6.14	<u>Trasporti del processo 1m2 di parete di laterizio</u>	96
6.15	<u>Energia del processo 1m2 di parete di laterizio</u>	96
6.16	<u>Trattamento rifiuti del processo 1m2 di parete di laterizio</u>	97
6.17	<u>Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio</u>	98
6.18	<u>Materiali del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio</u>	99
6.19	<u>Strumenti del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio</u>	99
6.20	<u>Trasporti del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio</u>	100
6.21	<u>Energia del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio</u>	100
6.22	<u>Emissioni del processo Produzione malta cementizia per allettare un singolo mattone di laterizio</u>	101
7.1	<u>I costi esterni e i costi interni del mattone</u>	115