



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Architettura Costruzione e Città
A.a 2024 / 2025

Tesi di Laurea Magistrale

La terra cruda nell'architettura contemporanea: evoluzione tecnologica, sperimentazioni e sfide costruttive nel progetto contemporaneo

Relatore:
Prof. Guido Callegari

Candidata:
Chiara Jayatunga Arachchige

s 311480

La terra cruda nell'architettura
contemporanea:
evoluzione tecnologica, sperimentazioni
e sfide costruttive nel progetto
contemporaneo

Abstract

ITA I

Il settore delle costruzioni è oggi tra i maggiori responsabili dell'inquinamento ambientale, ma non è sempre stato così. Da secoli, l'uomo realizza edifici utilizzando le risorse naturali disponibili, principalmente per proteggersi dagli agenti atmosferici. Tuttavia, con l'aumento della produzione edilizia, si è fatto un uso sempre più intensivo di risorse non rinnovabili, con conseguenze ambientali crescenti. Negli ultimi anni, l'interesse per i materiali naturali è tornato in primo piano, spinto dalla domanda di sostenibilità e benessere negli spazi abitativi e lavorativi. In questo contesto, i materiali bio based, fra i quali la terra cruda emerge come materiale chiave per l'edilizia sostenibile, affiancata da un ruolo strategico della tecnologia. Non si tratta di un semplice ritorno al passato, ma di analizzare e documentare l'evoluzione tecnologica che ha permesso di innovare l'uso di materiali tradizionali, combinando saperi antichi con potenzialità moderne. L'obiettivo principale della tesi è documentare come il progresso tecnologico abbia favorito il recupero e l'innovazione nell'impiego della terra cruda, evidenziandone potenzialità, applicazioni contemporanee e le sfide ancora aperte per una sua diffusione efficace nell'edilizia contemporanea.

ENG I

The construction sector is today among the major contributors to environmental pollution, but this has not always been the case. For centuries, humans have built structures using the natural resources available, primarily to protect themselves from the elements. However, with the growth of building activity, the use of non-renewable resources has become increasingly intensive, leading to mounting environmental consequences. In recent years, interest in natural materials has returned to the forefront, driven by the demand for sustainability and well-being in living and working spaces. In this context, raw earth emerges as a key material for sustainable construction, alongside the strategic role of technology. This is not simply a return to the past, but an effort to analyze and document the technological evolution that has enabled the innovation of traditional materials, combining ancient knowledge with modern potential. The main aim of this thesis is to demonstrate how technological progress has facilitated the recovery and innovation of raw earth as a sustainable building material, highlighting its potential, contemporary applications, and the remaining challenges to its effective diffusion in modern construction.

Indice

	Abstract	6
	Introduzione	10
01	La questione ambientale	
	1.0 Insostenibilità del settore edilizio	16
	1.1 Materiali bio-based per un'architettura sostenibile	16
	1.2 Dal modello lineare a quello circolare: una transizione necessaria	20
	1.3 Modern Methods of construction (MMC)	24
02	Innovazioni tecnologiche delle costruzioni in terra cruda: nuovi processi e sistemi	
	2.0 La costruzione artigianale della terra cruda: terra battuta e adobe	32
	2.1 Dall'era industriale all'innovazione digitale	34
	2.2 Evoluzione tecnologica della costruzione in terra cruda	36
	2.2.1 La meccanizzazione della costruzione in terra cruda	36
	2.2.2 La prefabbricazione dei materiali in terra cruda	38
	2.2.3 Sistemi innovativi e Robotica per la costruzione in terra cruda	40
	2.2.4 Stampa 3D e digitalizzazione	44
	2.2.5 Approfondimento caso studio aziendale: Lehm ton erde	48
	2.2.6. Approfondimento caso studio aziendale: Wasp	64
	2.3 Confronto tra le principali innovazioni applicate alla terra cruda	80
03	Casi studio. Il progetto di architettura in terra cruda: nuovi approcci e visioni	
	3.0 Tecnologie e Innovazione nei Processi Costruttivi in Terra Cruda: Analisi di Casi Studio Europei	86
	3.0.1 La metodologia di analisi	88
	3.0.1 Criteri di selezione	88
	3.1 Processo di costruzione meccanizzata on site	92
	3.1.1 Casa Rauch, Austria (2008)	94
	3.1.2 Casa De Tapia, Spagna (2014)	116

04

3.1.3 Cimitero Bushey, Inghilterra (2017)	132
3.2 Processo di costruzione off site	144
3.2.1 Ricola Herb Centre, Svizzera (2013)	146
3.2.2 Alnature Campus, Germania (2019)	164
3.3 Processo costruttivo con stampa 3D	178
3.3.1 Gaia, Italia (2018)	180
3.3.2 Tecla, Italia (2021)	190
3.4 Confronto tra casi studio	204

Riscoprire le radici della terra cruda per guidare l'innovazione

4.0 cenni storici	212
4.1 La terra cruda: Genesi e definizione	216
4.1.1 Composizione e proprietà	216
4.1.2 Distribuzione dei grani	218
4.1.3 Test per analizzare la composizione della terra	220
4.1.4 Tecniche di costruzione tradizionali	222
4.1.4.1 Il patrimonio costruito in terra battuta in Piemonte	224
4.1.5 Caratteristiche meccaniche e affidabilità strutturale delle costruzioni in terra cruda	228
4.2 Stabilizzazione della Terra cruda: approcci tradizionali e soluzioni Biobased	230
4.3 Vantaggi e accorgimenti della costruzione in terra	236

05

I limiti del sistema

5.0 Per quale motivo la costruzione in terra cruda, nonostante i suoi vantaggi, non viene applicato in modo diffuso?	244
5.0.1 Considerazioni economiche	245
5.0.2 Limitazioni del quadro normativo in Italia	245
5.0.3 Barriere culturali della progettazione in terra cruda	247
Conclusioni	253
Bibliografia e Sitografia	256

Introduzione

Viviamo in un'epoca in cui la pressione esercitata dall'uomo sugli ecosistemi ha raggiunto livelli senza precedenti. Secondo WWF e Global Footprint Network, se l'intera popolazione mondiale adottasse gli attuali modelli di consumo occidentali, servirebbero da uno a sei pianeti per sostenere tale stile di vita. La crisi climatica e ambientale è ormai una delle sfide più complesse e urgenti del nostro tempo, con effetti diretti e indiretti sugli ecosistemi, sulle società e sull'equilibrio globale.

Il riscaldamento globale, causato dall'aumento delle concentrazioni di gas serra derivanti dalle attività umane, sta trasformando profondamente il sistema climatico terrestre. Dal periodo preindustriale a oggi la temperatura media globale è cresciuta di circa $+1,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹, con un'accelerazione marcata negli ultimi decenni: il decennio 2010-2019 è stato il più caldo mai registrato e 19 dei 20 anni più caldi si sono verificati dopo il 2000². Secondo i dati del programma europeo di osservazione della Terra Copernicus, il 2022 ha registrato l'estate più calda mai rilevata in Europa ed è stato il secondo anno più caldo a livello globale.

Gli impatti sono già evidenti: scioglimento accelerato di ghiacci polari e montani, innalzamento del livello del mare, eventi estremi più frequenti e intensi, dalle inondazioni alle ondate di calore, dagli incendi alle siccità prolungate. Questi fenomeni compromettono la sicurezza alimentare, le risorse idriche e l'abitabilità di intere aree del pianeta. Poiché le emissioni già immesse persisteranno per secoli, è impossibile annullare gli effetti già innescati³; tuttavia, agire subito per ridurre drasticamente le emissioni di CO₂ può ancora limitare i danni futuri. Ogni decimo di grado evitato si traduce in benefici tangibili per la salute umana, la resilienza degli ecosistemi e la sostenibilità delle risorse.

In questo scenario, il settore edilizio gioca un ruolo cruciale: ad alta intensità energetica, dipendente da risorse non rinnovabili e responsabile di ingenti emissioni, produce enormi quantità di rifiuti. Ridurre l'impatto dell'edilizia significa ripensare progettazione, materiali e gestione dell'intero ciclo di vita delle costruzioni, privilegiando materiali naturali, rinnovabili e locali.

Da qui l'interesse crescente per soluzioni costruttive alternative che riducano l'uso di risorse e le emissioni, promuovendo una maggiore resilienza ambientale. L'architettura contemporanea sta riscoprendo materiali naturali. Tra i materiali naturali ed economicamente sostenibili oggetto di recente rivalutazione, la terra cruda si distingue come un elemento di primaria importanza nel panorama delle costruzioni e dell'architettura sostenibile. Questo materiale si caratterizza per le sue proprietà intrinseche di comfort abitativo e di efficienza economica, sia nella gestione che nelle prestazioni energetiche, rispondendo efficacemente alle crescenti esigenze di sostenibilità e funzionalità nel settore edilizio contemporaneo⁴.

1 Commissione europea, *Le cause dei cambiamenti climatici*, in "Climate action"; https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it

2 Parlamento europeo, *Le soluzioni dell'UE per contrastare i cambiamenti climatici*, in "Tematiche Parlamento europeo", 24 gennaio 2025. <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20180703STO07129/le-soluzioni-dell-ue-per-contrastare-i-cambiamenti-climatici>

3 Stefano Nespor, *La scoperta dell'ambiente: Una rivoluzione culturale*, i Robinson / Letture, Bari, 2020, pag. 194

4 Giorgi, Alessandro. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Roma: Aracne Editrice, 2014, pag. II

Oltre agli aspetti ambientali, la “riscoperta” della terra cruda risponde anche a motivazioni culturali. Alla necessità di ridurre inquinamento e consumo di energia si affianca il desiderio di recuperare un rapporto più armonico con l’ambiente, superando i confini tra tradizione e innovazione. Questo ha portato a riconsiderare la possibilità di utilizzare la terra cruda anche nelle nuove edificazioni.

Affinché ciò avvenga, servono proposte progettuali capaci di valorizzarne le peculiarità costruttive, trasformando quelli che un tempo erano limiti in opportunità. In questo percorso, la tecnologia applicata in modo efficace gioca un ruolo strategico: strumenti e processi già disponibili oggi permettono di lavorare la terra cruda in maniera più rapida, standardizzata e sicura, rendendola competitiva con i materiali convenzionali e adattandola alle esigenze del mercato contemporaneo.

Tuttavia, il tema della costruzione in terra cruda nell’architettura contemporanea, soprattutto nelle sue declinazioni innovative e tecnologiche, resta ancora poco indagato nella letteratura specialistica⁵. Questa lacuna ha reso necessario fondare l’analisi prevalentemente su articoli di ricerca e pubblicazioni scientifiche, che hanno fornito il quadro teorico e tecnico indispensabile per sviluppare lo studio.

La struttura della tesi è stata concepita per strutturare un percorso di analisi capace di unire riflessione storica, approfondimento tecnico e analisi critica, con l’obiettivo di indagare il ruolo dell’evoluzione tecnologica nella costruzione in terra cruda.

Il **primo capitolo** introduce il contesto generale, segnato dalle attuali sfide ambientali e dalla crescente consapevolezza dell’impatto del settore edilizio sul cambiamento climatico. Viene messo in luce il ritorno di interesse verso i materiali naturali e, in particolare, verso la terra cruda, riscoperta come risorsa in grado di combinare sostenibilità e qualità architettonica. All’interno di questo quadro si delineano le basi concettuali e tecnologiche che oggi ne consentono una rivalutazione in chiave contemporanea.

Dalla cornice introduttiva si passa, nel **secondo capitolo**, al focus principale. L’attenzione si concentra sull’evoluzione tecnologica che, negli ultimi decenni, ha trasformato profondamente il modo di costruire in terra cruda: dalle tecniche manuali e tradizionali si passa alle forme più avanzate di prefabbricazione, automazione e digital fabrication. Questo passaggio segna il momento in cui il materiale, da soluzione antica, diventa protagonista di un linguaggio costruttivo innovativo. Presentare queste trasformazioni sin da subito permette di fornire un quadro chiaro delle possibilità operative, preparando così il terreno per l’analisi dei casi concreti nel capitolo successivo. Un approfondimento specifico è stato condotto sulle aziende coinvolte nei processi di prefabbricazione e stampa 3D, tra cui Lehm Ton Erden, attiva nella produzione e commercializzazione di componenti prefabbricati in terra battuta, e WASP, azienda italiana specializzata nella produzione di stampanti 3D, tra cui la stampante Crane wasp per l’edilizia in terra cruda. Quest’ultima realtà è stata oggetto anche di una visita diretta svolta in data 28/06/2024, con l’obiettivo di comprendere da vicino le implicazioni tecnologiche e progettuali del processo.

5 Jean Dethier, *Abitare la terra: una nuova storia dell’architettura in terra cruda*, in “architectural-review”, 31 Gennaio 2020. <https://www.architectural-review.com/essays/inhabiting-the-earth-a-new-history-of-raw-earth-architecture>,

Il **terzo capitolo** rappresenta infatti l'applicazione pratica di quanto illustrato in precedenza. Qui vengono raccolti sette casi studio europei selezionati come esempi emblematici di utilizzo della terra cruda in progetti contemporanei. Ogni caso è analizzato non solo per le scelte tecnologiche adottate, ma anche in relazione ai contesti culturali, normativi ed economici che ne hanno influenzato lo sviluppo. In questo modo, le innovazioni presentate nel capitolo precedente trovano una loro concreta manifestazione nella pratica progettuale, offrendo esempi tangibili e ispirazioni per ulteriori sviluppi.

Da questa analisi empirica si passa, nel **quarto capitolo**, a una riflessione più tecnica e critica. Per poter utilizzare in modo razionale un materiale da costruzione, come in questo caso la terra cruda, è indispensabile approfondirne la conoscenza, così da proiettarsi verso un futuro in cui possa essere impiegata come tecnica sostenibile a pieno titolo. Il capitolo esplora quindi la terra cruda a partire dalla sua composizione e dalle tecniche costruttive tradizionali, per analizzarne in profondità le potenzialità e i limiti. L'obiettivo è individuare quali aspetti debbano essere affrontati per garantirne un'applicazione efficace e consapevole nell'architettura contemporanea.

Infine, il **quinto capitolo** chiude il percorso con uno sguardo rivolto al futuro. Qui vengono individuate i principali limiti che ancora ostacolano la diffusione della terra cruda e vengono proposte strategie per favorirne l'adozione su larga scala.

In sintesi, il lavoro mette in luce come il progresso tecnologico abbia avuto un ruolo decisivo nel ridefinire le possibilità costruttive della terra cruda, trasformandola da materiale tradizionale a risorsa contemporanea di grande valore. L'integrazione di strumenti avanzati e processi innovativi apre oggi la strada a soluzioni architettoniche capaci di coniugare rispetto ambientale, qualità realizzativa e libertà creativa, restituendole una rinnovata centralità nel panorama architettonico odierno.

01

LA QUESTIONE AMBIENTALE E IL RUOLO DEL SETTORE EDILIZIO

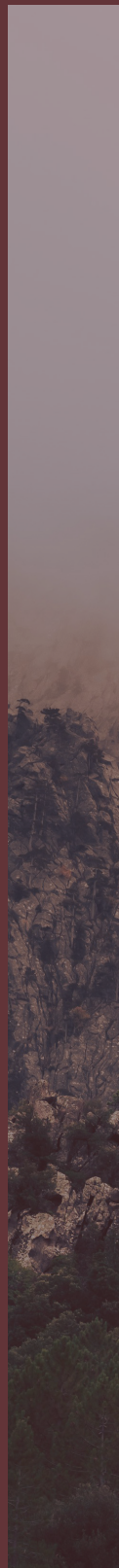




Fig.1 Fotografia di Guillaume de Germain. Fonte: <https://unsplash.com/it/foto/una-montagna-molto-alta-con-molti-alberi-in-cima-Cw32BYC8jPw>

1.0 Insostenibilità del settore edilizio

Le dinamiche produttive delle società industrializzate si fondano ancora in gran parte sull'impiego di risorse non rinnovabili, materiali che non si rigenerano in tempi compatibili con la durata della vita umana.

Nel settore edilizio, la forte dipendenza da materiali ad alta intensità estrattiva, come cemento, acciaio e materie plastiche, genera gravi impatti ambientali. Questo modello produttivo provoca un progressivo impoverimento delle riserve naturali e incide pesantemente sull'assetto del territorio, sulle emissioni di CO₂ e sull'equilibrio degli ecosistemi.

Un dato emblematico riguarda il cemento: in soli tre anni (2011-2013) la Cina ha consumato più cemento di quanto gli Stati Uniti abbiano utilizzato in un intero secolo (1910-2000), pari rispettivamente a 6,6 gigatoni contro 4,5 gigatoni⁶. Questa cifra evidenzia l'enorme pressione che la produzione di cemento nel settore edilizio esercita sulle risorse e sull'ambiente. Sebbene la Cina domini la produzione mondiale con 2.480 milioni di tonnellate di cemento all'anno, anche altri paesi, tra cui India, USA, Brasile, Russia e Giappone, contribuiscono in modo significativo, segnalando come la domanda di cemento sia globale e in costante crescita.

Di fronte a questo scenario, diventa urgente un cambio di paradigma nelle pratiche edilizie. La bioedilizia rappresenta una risposta concreta, promuovendo l'uso di materiali naturali, provenienti da fonti rinnovabili, riciclabili e non tossici, capaci di garantire un impatto ridotto in tutte le fasi del ciclo di vita dell'edificio. Tuttavia, la sostenibilità del costruito non si limita alla scelta dei materiali: richiede una visione olistica che consideri l'origine delle materie prime, le modalità di lavorazione, il loro impiego in cantiere e le strategie di smaltimento o riuso a fine vita.

1.1 Materiali bio-based per un'architettura sostenibile

Negli ultimi anni, il mondo dell'architettura e dell'edilizia ha visto crescere in modo significativo l'interesse verso i materiali naturali, spinto dalla necessità di ridurre l'impatto ecologico delle costruzioni. Questo rinnovato interesse ha dato impulso a numerose ricerche e alla riscoperta di materiali costruttivi antichi, oggi reinterpretati attraverso approcci e tecnologie moderne, con l'obiettivo di realizzare edifici resistenti, confortevoli e a basso impatto ambientale, minimizzando le emissioni di CO₂ lungo l'intero ciclo di vita.

Tra i materiali attualmente oggetto di sperimentazione e integrazione nei processi avanzati di costruzione troviamo le soluzioni bio-based a crescita rapida⁷, come bambù, canapa, canna, paglia e lino. Questi materiali sono in grado di assorbire più carbonio di quanto ne emettano nei processi di trasformazione, generando soluzioni carbon-neutral o persino

⁶ Heringer, Anna, Lindsay Blair Howe, and Martin Rauch. *Upscaling Earth: Material, Process, Catalyst*, Verlag, 2019 Zürich: gta Verlag, 2019, pag. 34

⁷ I materiali a crescita rapida sono risorse naturali o colture che hanno una crescita rapida, il che li rende prontamente disponibili per il raccolto e l'uso in un breve periodo. Fonte: Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2023). *Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals*. Applied Sciences, 14(11), 4850. <https://doi.org/10.3390/app14114850>

CEMENT USE

CHINA USED MORE CEMENT
IN 3 YEARS THAN THE U.S.
OVER THE LAST 100

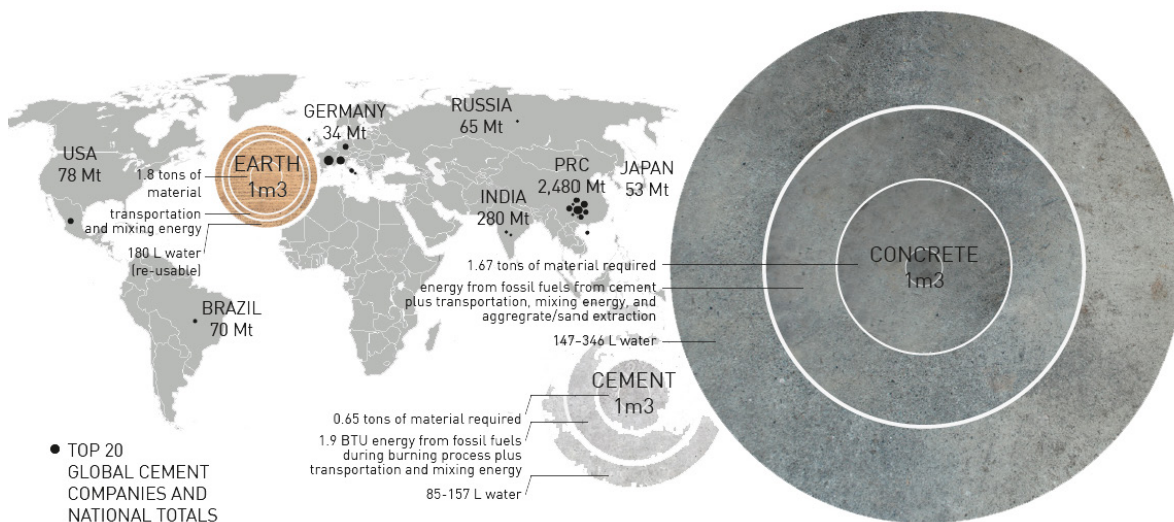
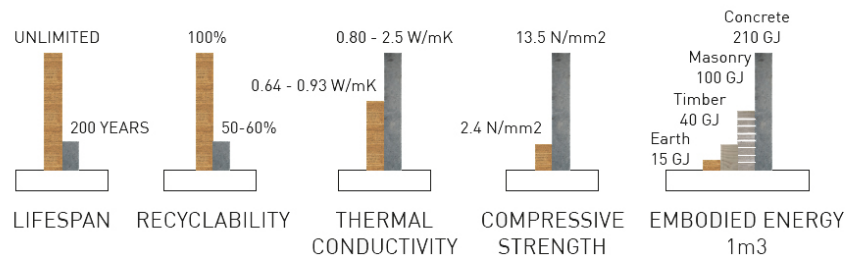
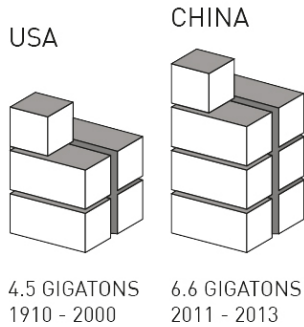


Fig. 2 Heringer, Anna, Lindsay Blair Howe, and Martin Rauch. *Upscaling Earth: Material, Process, Catalyst*, Verlag, 2019
Zürich: gta Verlag, 2019, pag. 34

carbon-negative. Strumenti di valutazione come BEAM⁸ e MARS-SC⁹ certificano le prestazioni ambientali, con riduzioni dell'impatto fino al 185% per i pannelli in paglia e fino al 158% per la canapa, rispetto alle soluzioni convenzionali¹⁰. Anche sottoprodotti agricoli come lolla e pula di riso, considerati scarti della lavorazione del riso, stanno acquisendo un ruolo chiave nella realizzazione di compositi naturali e soluzioni edilizie ecocompatibili, grazie alla loro disponibilità e alle proprietà isolanti.

Per esempio:

- La paglia di riso (lo stelo secco del chicco) è impiegata come isolante naturale in pareti prefabbricate in legno, sotto forma di balle precomprese, garantendo isolamento termico e acustico, salubrità e traspirabilità.
- La lolla di riso, il guscio esterno ricco di lignina, si rivela un eccellente isolante traspirante per abitazioni in legno o terra cruda, utile anche per massetti e termo-intonaci.
- La pula di riso, lo strato sottostante la lolla, è utilizzata in intonaci naturali a base di calce o argilla, grazie alla sua resistenza ai raggi UV, traspirabilità e durabilità agli agenti atmosferici¹¹.

Anche i materiali a crescita rapida sono noti principalmente per le loro proprietà isolanti dovute alla loro composizione fibrosa, ma le loro applicazioni vanno ben oltre l'isolamento.

Si tratta infatti di componenti versatili, capaci di rispondere a molteplici esigenze progettuali¹²:

8 **BEAM** (Building Environment Assessment Model) è uno strumento di valutazione ambientale che consente di analizzare l'impatto ambientale dei materiali da costruzione concentrandosi esclusivamente sulla fase di prodotto del ciclo di vita, dall'estrazione alla fabbricazione, incluso il trasporto. Questa fase, secondo stime, può rappresentare dal 65% all'85% delle emissioni complessive associate ai materiali da costruzione. BEAM considera anche il potenziale di stoccaggio del carbonio, ma non include le fasi successive (costruzione, uso, manutenzione e fine vita), per evitare l'introduzione di ipotesi che potrebbero comprometterne l'affidabilità. Fonte: Cosentino, L.; Fernandes, J.; Mateus, R. *Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals*. Appl. Sci. 2024, 14, 4850. <https://doi.org/10.3390/app14114850>

9 La metodologia **MARS-SC** (Metodologia per la Valutazione Relativa della Sostenibilità delle Soluzioni di Costruzione), sviluppata da Mateus, è uno strumento multicriterio che consente di confrontare diverse soluzioni costruttive sulla base di criteri ambientali, funzionali ed economici. Fornisce un supporto decisionale per identificare le opzioni più sostenibili in relazione a specifici obiettivi progettuali, e aiuta a individuare aree critiche su cui orientare ricerca e innovazione nel settore edilizio. Fonte: Cosentino, L.; Fernandes, J.; Mateus, R. *Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals*. Appl. Sci. 2024, 14, 4850. <https://doi.org/10.3390/app14114850>

10 Cosentino, L.; Fernandes, J.; Mateus, R. *Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals*. Appl. Sci. 2024, 14, 4850. <https://doi.org/10.3390/app14114850>

11 *Case in legno e lolla di riso: il materiale più innovativo in edilizia è coltivabile*, in "Gruppo Secchiarioli", 13 gennaio 2024. <https://www.grupposecchiarioli.it/case-in-legno-e-lolla-di-riso-il-materiale-pi-innovativo-in-edilizia-coltivabile-b171.php>

12 Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2023). *Fast-Growing Bio-Based Construction*

- Il bambù, ad esempio, è utilizzato come materiale strutturale in travi, solai e telai portanti.
- La canapa può essere impiegata in blocchi da costruzione (hempcrete), pannelli prefabbricati e intonaci naturali.
- Materiali come paglia e lino, trovano impiego in pavimenti, rivestimenti, intonaci decorativi, tegole di copertura e pannelli acustici, combinando prestazioni tecniche ed estetica architettonica.

È evidente come l'innovazione nei processi produttivi e costruttivi, supportata dall'evoluzione tecnologica, ha permesso la creazione di prodotti all'avanguardia in ambito edilizio, offrendo alternative performanti e sostenibili rispetto ai materiali tradizionali.

Un ruolo di particolare rilievo spetta alla terra cruda, una delle risorse più antiche e versatili. Abbondante e locale, è interamente riciclabile, priva di emissioni di CO₂ in fase produttiva e riutilizzabile senza perdita di qualità. Le sue proprietà includono la regolazione dell'umidità, l'assorbimento di odori, ottime prestazioni acustiche e termiche e la possibilità di realizzare strutture portanti. Rispetto a materiali ad alto impatto come il cemento, la terra cruda si distingue per un'impronta ambientale nettamente inferiore: non richiede processi termici ad alta temperatura, né l'estrazione intensiva di sabbia e ghiaia, risorse sempre più scarse.

Il confronto con il cemento evidenzia la portata di questa differenza: la sua produzione, responsabile di circa l'8% delle emissioni globali di CO₂¹³, genera fino a 800 kg di anidride carbonica per ogni tonnellata prodotta, a causa del processo di calcinazione e dell'uso di combustibili fossili. A ciò si sommano gli impatti legati al trasporto, all'uso di elettricità e all'estrazione di materie prime, con danni ambientali rilevanti.

L'integrazione di fibre naturali come canapa, paglia, o lolla di riso nella terra cruda ne migliora ulteriormente le prestazioni termo-igrometriche, riduce il ritiro in fase di essiccazione e aumenta il comfort abitativo. Per soddisfare appieno le esigenze dell'architettura contemporanea, è però necessario l'impiego di tecnologie avanzate come strumenti di prefabbricazione, la stampa 3D, la definizione di standard prestazionali e la formazione di competenze specialistiche.

l'adozione di materiali naturali, oltre a portare benefici ambientali, valorizza le risorse locali, stimola lo sviluppo di filiere produttive sostenibili e circolari, contribuendo al raggiungimento degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, in particolare SDG 11 (Città e comunità sostenibili) e SDG 12 (Consumo e produzione responsabili).

Materials as an Approach to Accelerate United Nations Sustainable Development Goals. Applied Sciences, 14(11), 4850. <https://doi.org/10.3390/app14114850>

¹³ Heringer, Anna, Lindsay Blair Howe, and Martin Rauch. *Upscaling Earth: Material, Process, Catalyst*, Zurich Verlag, 2019, pag. 32.

1.2 Dal modello lineare a quello circolare per un futuro sostenibile

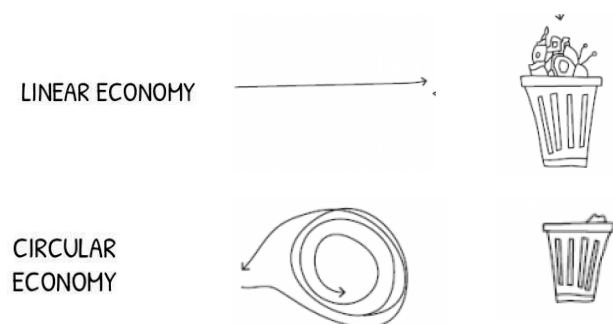


Fig. 3 Rappresentazione schematica del sistema di economia lineare e circolare. Rielaborazione tratto da <https://www.london.gov.uk/publications/circular-economy-statement-guidance>

L'attuale modello economico dominante, definito lineare o *take-make-waste*¹⁴, si fonda sull'estrazione di risorse, la produzione di beni e il loro smaltimento come rifiuti al termine del ciclo di vita. Questo approccio, che per decenni ha sostenuto la crescita industriale e il benessere delle società moderne, si è rivelato insostenibile nel lungo periodo: il consumo intensivo di risorse naturali non rinnovabili, unito a un'elevata produzione di rifiuti, ha generato impatti ambientali di vasta portata, tra cui il cambiamento climatico, la perdita di biodiversità e il degrado degli ecosistemi.

Proprio in risposta a tali criticità si è affermato il concetto di economia circolare, un modello economico rigenerativo che mira a disaccoppiare la crescita economica dal consumo di risorse finite. Secondo la definizione della Ellen MacArthur Foundation, l'economia circolare è "un'economia pensata per potersi rigenerare da sola", in cui i materiali seguono due cicli distinti ma complementari: il ciclo biologico, in cui le risorse sono reintegrate nella biosfera, e il ciclo tecnico, in cui i materiali vengono mantenuti in uso attraverso processi di riuso, riparazione, ricondizionamento e riciclo¹⁵.

Il passaggio a un modello circolare si fonda su nove principi che fungono da linee guida delle strategie da attuare per portare il sistema alla circolarità. Queste nove "R" sono raggruppate in tre categorie, a seconda dell'obiettivo di economia circolare a cui contribuiscono :

Un settore in cui l'applicazione di questi principi è particolarmente urgente è quello dell'edilizia. L'industria delle costruzioni è infatti responsabile di oltre il 35,9%¹⁶ dei rifiuti totali dell'Unione Europea e contribuisce in modo significativo all'impronta ambientale complessiva sia per il consumo di materiali che per le emissioni di gas serra. Attualmente, il ciclo di vita degli edifici è prevalentemente unidirezionale: si estraggono materie prime, si produce, si utilizza e infine si demolisce, con la conseguente generazione di rifiuti non recuperabili.

¹⁴ *What is linear economy?*, in "Ellen Macarthur Foundation", 10 febbraio 2023. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/what-is-the-linear-economy>

¹⁵ *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*, in "Ellen Macarthur Foundation", 1 Dicembre 2015. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>

¹⁶ C. Daniele, R. Ennio, *Le sfide del mondo dei rifiuti nel settore delle costruzioni*, in "ingenio", 8 giugno 2022. <https://www.ingenio-web.it/articoli/le-sfide-del-mondo-dei-rifiuti-nel-settore-delle-costruzioni/>

Obbiettivo	Strategia	Definizione
Fabbricare e utilizzare il prodotto in maniera più intelligente	R0 Rifiutare	Rendere il prodotto superfluo abbandonando la sua funzione o offrendo la stessa funzione con un prodotto radicalmente diversi
	R1 Ripensare	Fare uso intensivo di un prodotto (es.condivisione)
Estendersi la vita del prodotto e delle sue parti	R2 Ridurre	Aumenta l'efficienza nella produzione o uso dei prodotti riducendo l'uso di risorse naturali o materiali
	R3 Riuso	Riuso di un prodotto scartato ancora in buone condizioni e che svolge la sua funzione originale parte di un nuovo consumatore
	R4 Riprovare	Riparazione e manutenzione di un prodotto malfunzionante così da poterlo utilizzare nella sua funzione originale
	R5 Rinnovare	Ripristinare un vecchio prodotto e aggiornarlo
	R6 Rifabbricare	Usare prodotti scartati o sue parti in un nuovo prodotto con stessa funzione
	R7 Riquilificare	Usare prodotti scartati o sue parti in un nuovo prodotto con una funzione diversa
Applicazione utile dei materiali	R8 Riciclo	Processare i materiali per ricavarne la stessa qualità o più bassa
	R9 Recupero	Recupero di energia tramite incenerimento dei materiali

Tabella 1: Paradigma delle R. Fonte: <https://economiecircolare.com/glossario/paradigma-delle-r/><https://economiecircolare.com/glossario/paradigma-delle-r/>

Un approccio circolare al settore edilizio promuove invece la realizzazione di edifici flessibili, modulari, smontabili e riparabili, progettati per essere rigenerati o per consentire il reimpiego dei loro componenti in altri cicli produttivi.

Per supportare questa transizione, la Ellen MacArthur Foundation ha sviluppato il framework ReSOLVE¹⁷, che identifica sei azioni strategiche applicabili a prodotti, processi e sistemi economici:

- Regenerate: passaggio a fonti rinnovabili e rigenerazione degli ecosistemi;
- Share: promozione dell'utilizzo condiviso dei beni per estenderne il ciclo di vita;
- Optimise: incremento dell'efficienza e riduzione degli sprechi lungo tutta la catena del valore;
- Loop: mantenimento dei materiali all'interno di cicli chiusi tramite riuso, rigenerazione e riciclo;
- Virtualise: sostituzione dei prodotti fisici con soluzioni digitali;
- Exchange: adozione di materiali innovativi e tecnologie emergenti per migliorare la sostenibilità.

Tuttavia, per trasformare l'edilizia in chiave circolare è necessario affrontare una questione centrale: la gestione dei rifiuti da costruzione, demolizione ed escavazione (CDEW). Questi rappresentano circa un terzo dei rifiuti complessivi nell'UE e, in Italia, il 40% del totale, con un potenziale di recupero stimato attorno al 90%¹⁸. Il fine vita di un edificio può seguire tre percorsi principali, restauro, demolizione o abbandono, ma la demolizione, pur essendo la scelta più frequente, è anche la più impattante dal punto di vista ambientale.

Per ridurre tali impatti, tecniche come la demolizione selettiva permettono di rimuovere in sicurezza le sostanze nocive e facilitare la separazione di materiali riciclabili di alta qualità, mentre la progettazione modulare, smontabile e riparabile consente di estendere la vita utile degli edifici e reinserire più facilmente i materiali nei cicli produttivi. In questo ambito si distinguono due approcci:

- Upcycling, che riutilizza materiali di scarto per creare prodotti di qualità pari o superiore all'originale (es. legno massello riutilizzato per mobili di pregio);
- Downcycling, che ricicla i materiali con perdita di parte del loro valore e delle prestazioni (es. calcestruzzo demolito usato come sottofondo stradale)¹⁹.

¹⁷ Ellen MacArthur Foundation, *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe* (2015), pag. 18, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>

¹⁸ *Construction and demolition waste*, in "Environement", 12 dicembre 2008, https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en

¹⁹ P. Elisabetta, N. Silvia, C. Dario, B. Donato, B. Andrea, D. Gianmarco, P. Antonio, V. Nicolò, *L'Italia che Ricicla*, AssoAmbiente, Roma, 20 settembre 2023 <https://assoambiente.org/files/rapporto-italia-che-ricicla-2023.pdf>

Il ciclo di vita della terra

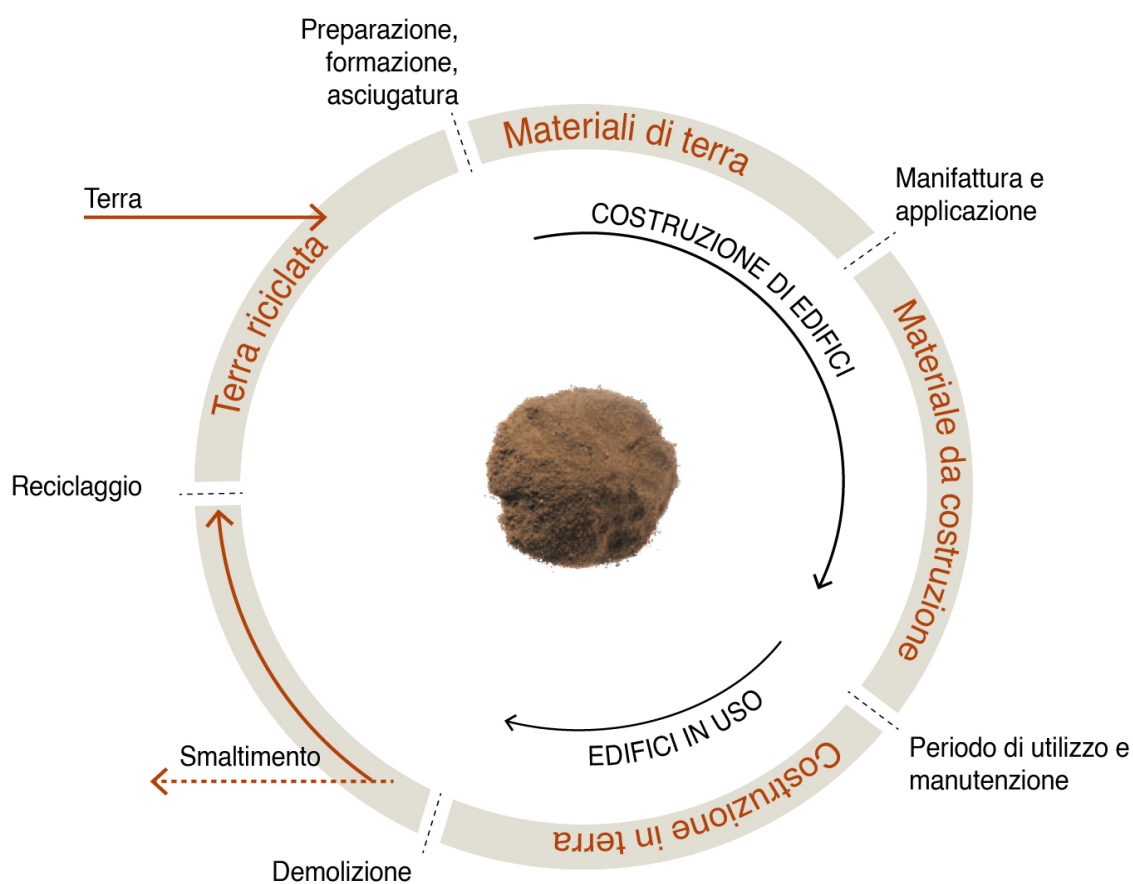


Fig. 4 Il ciclo di vita della terra. Rielaborazione personale tratta dalla fonte: Hannah Schreckenbach, Consulenti: Ulrich Röhl-en, Horst Schroeder, Eckhard Beuchel, Building with eart, Dachverband Lehm e.V, luglio 2004, pag. 3

In quest'ottica, l'impiego di materiali naturali si inserisce perfettamente nella logica della circolarità: non solo riduce l'impatto ambientale, ma facilita la reintroduzione dei componenti nei cicli produttivi, grazie alla loro compatibilità con i processi biologici e alla minore necessità di trattamenti complessi.

Una delle soluzioni più lungimiranti per un'edilizia realmente sostenibile è l'utilizzo della terra naturale, non trattata, prelevata direttamente dal suolo. Non esiste altro materiale che possa essere riciclato all'infinito senza perdita di qualità e che, una volta reintrodotta nell'ambiente, non generi alcuna forma di inquinamento. La transizione dall'attuale modello lineare a uno circolare è fondamentale per garantire un futuro più sostenibile, e richiede l'impegno congiunto di governi, imprese e cittadini. Secondo un'analisi di Bain & Company, incrementare la circolarità del settore edilizio in Europa dal 30% al 50% entro il 2040 potrebbe dimezzare le emissioni legate alla produzione²⁰.

1.3 Modern Methods of construction (MMC)

I Modern Methods of Construction (MMC), rappresentano un insieme di tecniche costruttive innovative finalizzate a migliorare l'efficienza, la qualità e la sostenibilità del settore edilizio rispetto ai metodi tradizionali²¹. Nell'ambito della terra cruda è possibile identificare una sperimentazione in tal senso.

Negli ultimi anni, infatti, la terra cruda si è distinta come risorsa strategica per l'edilizia sostenibile, trovando applicazione in sistemi tecnologicamente evoluti. In particolare, due approcci emergenti meritano attenzione: da un lato, la prefabbricazione off-site di pannelli modulari in terra battuta, impiegabili per pareti interne ed esterne; dall'altro, l'uso della stampa 3D in loco per realizzare moduli abitativi completi, con significativi vantaggi in termini di velocità di esecuzione, riduzione degli sprechi e libertà formale.

Entrambe le soluzioni si inseriscono all'interno delle categorie MMC di Pre-manufacturing 2D (Prefabbricazione: sistemi 2D) e Pre-manufacturing 3D primary structural systems (Prefabbricazione: sistemi 3D), contribuendo a ridefinire il ruolo della terra cruda nel panorama dell'architettura contemporanea.

I MMC si suddividono in sette categorie²²:



1. Prefabbricazione: sistemi 3D

Un approccio sistematizzato basato sulla costruzione volumetrica, che prevede la produzione di unità tridimensionali in condizioni controllate di fabbrica prima dell'installazione finale. Le unità volumetriche possono

²⁰ Edilizia, pronta per la sfida della circolarità, 24 gennaio 2023, <https://www.bain.com/it/about-bain/media-center/press-releases/italy/2023/Edilizia-pronta-per-la-sfida-della-circolarita/>

²¹ Thomas Brown, *Moderni metodi di costruzione nel settore immobiliare*, in "Biblioteca dei camera dei lord", 9 agosto 2024. Thomas Brown, *Moderni metodi di costruzione nel settore immobiliare*, "in Biblioteca dei camera dei lord", 9 agosto 2024.

²² Sam Hopkins, Matt Cooper, *MMC Report*, in "Government of Jersey – ARUP", 4 marzo 2022. PowerPoint Presentation

essere realizzate in varie forme, da una struttura di base fino a una completamente rifinita, con tutte le finiture interne ed esterne e gli impianti installati, pronte per l'installazione.



2. Prefabbricazione: sistemi 2D

Un approccio sistematizzato che utilizza pannelli piani per la realizzazione delle strutture base di pavimenti, pareti e coperture, in materiali vari, prodotti in ambiente di fabbrica e assemblati in cantiere per ottenere una struttura tridimensionale finale. L'approccio più comune prevede l'uso di pannelli aperti, o telai, costituiti solo da una struttura scheletrica, mentre impianti, isolamento, rivestimenti esterni e finiture interne vengono installati in cantiere. Pannelli più complessi, come i pannelli chiusi, comportano una fabbricazione più avanzata in fabbrica e includono materiali di rivestimento e isolamento. Possono anche comprendere impianti, finestre, porte, finiture interne delle pareti e rivestimenti esterni.



3. Prefabbricazione: componenti strutturali

Uso di elementi strutturali prefabbricati realizzati in legno ingegnerizzato (massiccio o intelaiato), acciaio profilato a freddo o laminato a caldo, o calcestruzzo prefabbricato. Gli elementi includono travi portanti, colonne, pareti, nuclei strutturali e solai che non sono costruiti principalmente in opera e non fanno parte di un progetto sistematizzato.

Questa categoria, sebbene focalizzata sugli elementi di sopraelevazione (superstruttura), include anche elementi di fondazione come cordoli prefabbricati, plinti di fondazione, pali infissi e pali a vite.



4. Prefabbricazione: produzione additiva

Stampa di parti di edifici tramite vari materiali, eseguita da remoto, in cantiere o presso il luogo di installazione finale, basata su tecniche digitali di progettazione e produzione.



5. Prefabbricazione: assemblaggi non strutturali

Una serie di approcci di prefabbricazione che include sistemi di pareti non strutturali, cassette di finiture per coperture, unità mini-volumetriche non portanti utilizzate in aree ad alta densità impiantistica e ripetibilità, come cucine e bagni, vani tecnici, cavedi locali impianti.



6. Riduzione della manodopera del prodotto e miglioramenti della produttività

Prodotti edilizi tradizionali singoli realizzati in formati più grandi, varianti pretagliate o con caratteristiche di giunzione facilitata. Consentono una significativa riduzione della manodopera necessaria in sito.



7. Riduzione del lavoro guidata dai processi e miglioramenti della produttività

Questa categoria comprende approcci che sfruttano tecniche innovative di costruzione in cantiere per migliorare i processi, al di fuori delle cinque principali categorie di prefabbricazione (1-5) o dell'innovazione nei materiali (Categoria 6).

Include misure di incapsulamento del luogo di lavoro secondo standard di fabbrica, tecniche di costruzione lean, tecnologie di supporto fisico e digitale per i lavoratori, robotica da cantiere, esoscheletri e altri dispositivi indossabili, droni, strumenti di verifica e l'adozione di nuove macchine e impianti guidati da tecnologie avanzate.

L'adozione dei metodi MMC consente di definire l'edificio principalmente in fase di progettazione, con una quota superiore al 90% delle lavorazioni svolta off-site²³, portando così a una significativa riduzione delle problematiche in cantiere e a un miglioramento della qualità esecutiva. Inoltre, l'integrazione di materiali naturali come la terra cruda consente di massimizzare i benefici delle tecniche innovative promuovendo un'edilizia più sostenibile.

In sintesi, il settore edile deve superare l'attuale modello lineare, ad alto consumo di risorse e impatto ambientale, adottando un approccio circolare che integri materiali naturali e processi innovativi. Soluzioni come terra cruda, bambù, canapa e paglia, unite a tecniche come prefabbricazione modulare e stampa 3D, permettono di ridurre sprechi, emissioni e costi, valorizzando filiere locali. I Modern Methods of Construction diventano così strumenti strategici per un'edilizia rigenerativa, capace di coniugare qualità, efficienza e sostenibilità, trasformando l'architettura in un motore di equilibrio tra ambiente, economia e società.

²³ Antonio J. Sánchez-Garrido, Ignacio J. Navarro, José García, Víctor Yepes, *A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning*, *Journal of Building Engineering*, Volume 73, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106725>

02

**INNOVAZIONI TECNOLOGICA DELLE
COSTRUZIONI IN TERRA CRUDA:
NUOVI PROCESSI E SISTEMI**



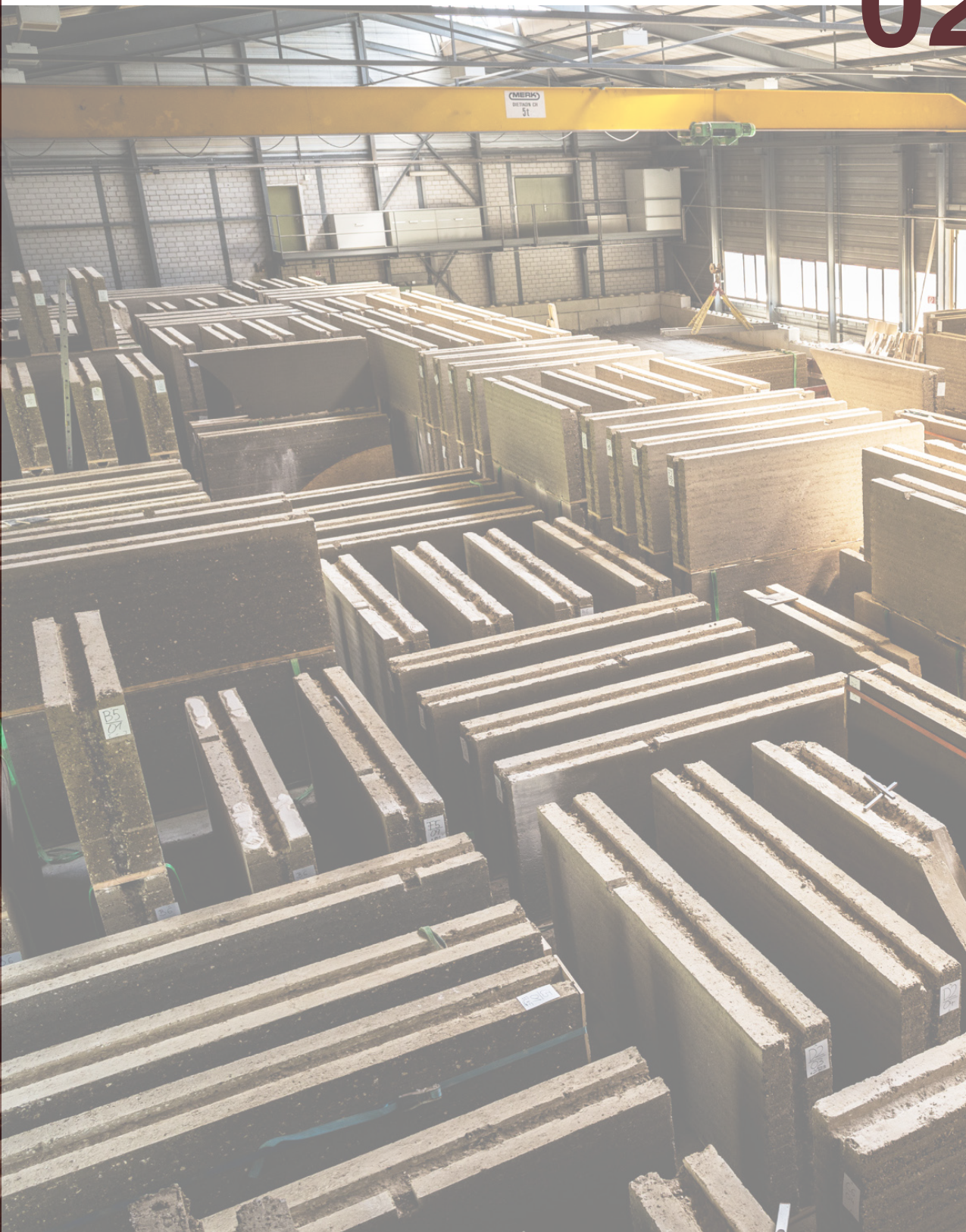
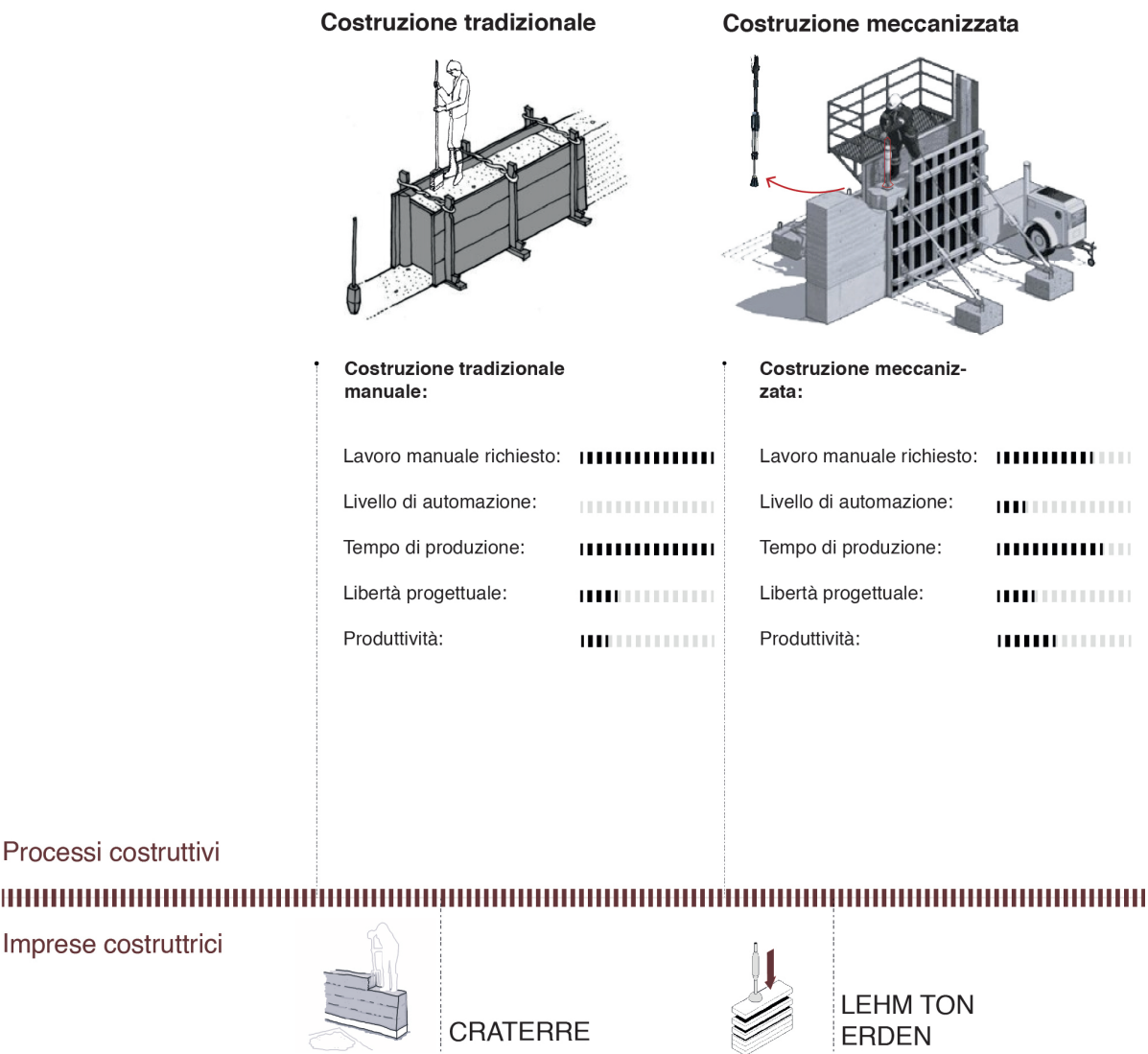
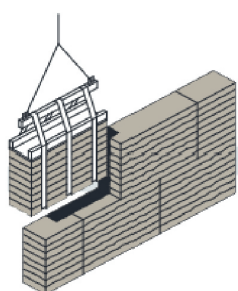


Fig. 5 Pannelli prefabbricati stoccati in azienda. Fonte: <https://arquitecturaviva.com/works/edificio-ricola-krauterzentrum-2>

Evoluzione tecnologica nelle costruzioni in terra cruda



Prefabbricazione



Costruzione prefabbricata:

Lavoro manuale richiesto: ██████████░░░░░░

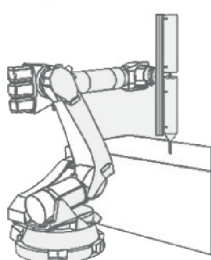
Livello di automazione: ██████████░░░░░░

Tempo di produzione: ██████████░░░░░░

Libertà progettuale: █████░░░░░░░░░░

Produttività: ██████████░░░░░░

Robotica



Costruzione digitale:

Lavoro manuale richiesto: █████░░░░░░░░░░

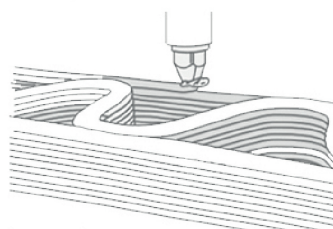
Livello di automazione: ██████████░░░░░░

Tempo di produzione: ██████████░░░░░░

Libertà progettuale: ██████████░░░░░░

Produttività: ██████████░░░░░░

Stampa 3D



Costruzione digitale:

Lavoro manuale richiesto: █████░░░░░░░░░░

Livello di automazione: ██████████░░░░░░

Tempo di produzione: ██████████░░░░░░

Libertà progettuale: ██████████░░░░░░

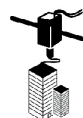
Produttività: ██████████░░░░░░



LEHM TON
ERDEN
ERDEN



ERNE



WASP

2.0 Dalla Costruzione artigianale all'industrializzazione

Prima dell'avvento dell'industria, costruire era un gesto profondamente umano, guidato dalla mano esperta dell'artigiano: da qui ha origine il lungo percorso di trasformazione tecnologica che ha cambiato radicalmente il modo di edificare.

La produzione artigianale, si fonda essenzialmente sulla manualità: gli strumenti e i macchinari utilizzati sono direttamente azionati dall'operatore e rappresentano un'estensione fisica del suo corpo. Questo legame profondo tra l'artigiano e il processo produttivo determina un ritmo scandito dai tempi biologici dell'essere umano, che diventa figura centrale grazie alle sue competenze altamente specializzate.

Nel modello artigianale, ideazione ed esecuzione coincidono: l'esito dell'opera dipende in larga misura dalle capacità individuali, e il prodotto finale si configura come un unicum, risultato del rapporto diretto tra esecutore e committente. La qualità è definita come rispetto delle "regole dell'arte", un insieme di saperi tramandati nel tempo, fondati su esperienza, buon senso e tradizione, e trasmessi oralmente dal maestro all'apprendista²⁴.

La costruzione artigianale in terra cruda, sia nella tecnica della terra battuta che dell'adobe come nelle altre tecniche tradizionali, si fonda su un elevato impiego di lavoro manuale e sull'uso di strumenti semplici, spesso autocostruiti.

Per la terra battuta si utilizza una miscela con il 10–15% di argilla, il 30–50% di limo e il 40–60% di sabbia²⁵. L'estrazione avviene preferibilmente in periodi umidi, sotto lo strato organico, con pala, zappa e piccone, evitando sassi e ghiaia. La terra viene trasportata con carriola e accumulata vicino alla zona di lavoro.

Si procede poi al vaglio, effettuato con setaccio manuale o a rullo, per eliminare pietre superiori ai 5 cm. L'umidificazione porta il materiale a un contenuto idrico del 12–18%, mediante irrigazione controllata o asciugatura naturale, a seconda delle condizioni. Una volta pronta la miscela, si montano i casseri in legno fissandoli con cunei, posizionati in bolla tramite distanziatori e livella. Il riempimento avviene a strati di massimo 20 cm, compattati fino a un terzo dello spessore iniziale con mazzeranga piatta per le superfici uniformi e prismatica per gli angoli. La progressione verticale prevede lo smontaggio e il rimontaggio dei casseri sopra lo strato già indurito, sfalsando i giunti verticali e inumidendo lo strato inferiore per migliorare l'adesione.

Per la tecnica dell'adobe²⁶ si utilizza una terra con il 14–18% di argilla, il 10–35% di limo e il 55–75% di sabbia, arricchita con paglia o pula in percentuali fino al 3%, con lunghezza massima di 5 cm, che vengono mescolato manualmente nei mesi caldi e ventilati.

24 Maria Luisa Germanà, *Architettura responsabile – Gli strumenti della tecnologia*, Dario Flacovio Editore s.r.l., Palermo, ottobre 2005, pag 26

25 Scudo, Gianni et al. *Costruire con la terra: tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2001, pag. 81

26 Scudo, Gianni et al. *Costruire con la terra: tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2001, pag. 116



L'estrazione, il vaglio e l'umidificazione avvengono con gli stessi strumenti manuali della terra battuta. L'impasto, dopo un riposo di alcune ore, viene inserito nelle forme di legno, compattato, livellato con staggia, rifinito con cazzuola, e infine sfornato. L'essiccazione avviene inizialmente in piano, poi in verticale dopo 2–5 giorni, fino a completa asciugatura. La posa dei blocchi prevede l'uso di malta di terra e strumenti come cazzuola, mazzetta, bolla e spago



Fig. 6 Tecnica tradizionale della terra battuta Fonte: <https://madeinearth.in/topics/techniques/rammed-earth/>

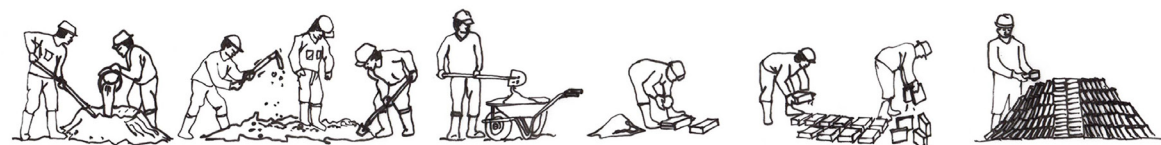


Fig. 7 Tecnica tradizionale dell'adobe. Fonte: <https://madeinearth.in/topics/techniques/adobe/>

Con l'avvento della produzione industriale, si è assistito a una trasformazione radicale delle pratiche costruttive. L'unitarietà del processo tipica dell'artigianato è stata spezzata: l'esecuzione è ora separata dalle fasi ideativa e progettuale, perdendo così il ruolo centrale che aveva in passato. La qualità non è più implicita come nel modello artigianale, ma diventa oggetto di definizioni, standard e controlli specifici, che si concretizzano in pratiche come il collaudo finale e i sistemi di gestione della qualità.

La diffusione globale dei processi industriali ha inoltre evidenziato il carattere relativo della tecnologia: essa non è intrinsecamente “buona” o “cattiva”, ma va valutata in relazione al contesto in cui si applica. Solo quando vi è coerenza tra hardware, software e brainware, ossia tra strumenti, logiche operative, competenze umane e la rete di sostegno, si può parlare di tecnologia appropriata²⁷.

L'evoluzione tecnologica delle tecniche e dei processi costruttivi, dalla manualità artigianale alla digitalizzazione dei processi, è un fenomeno che fa parte di una trasformazione storica ampia, scandita dalle diverse rivoluzioni industriali.

²⁷ Maria Luisa Germanà, *Architettura responsabile – Gli strumenti della tecnologia*, Dario Flacovio Editore s.r.l., Palermo, ottobre 2005, pag 27

2.1 Dall'era industriale all'innovazione digitale:

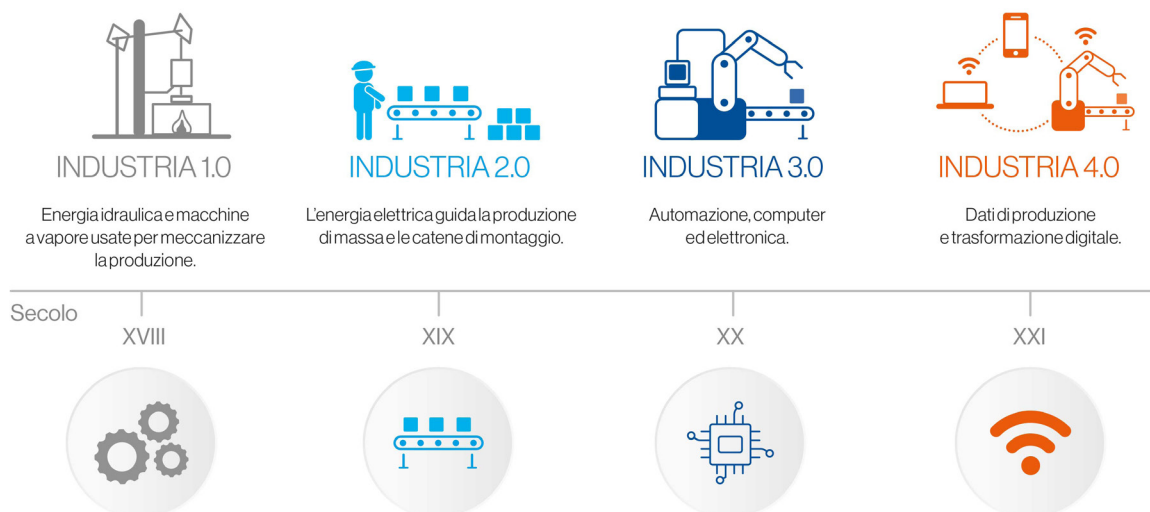


Fig. 8 Le tappe fondamentali dello sviluppo tecnologico. Fonte: <https://www.mecalux.it/articoli-sulla-logistica/trasformazione-digitale-yasel-costa>

La rivoluzione tecnologica ha interessato principalmente tre aspetti: i materiali, l'energia e la tecnologia di controllo che determinano il funzionamento e le modalità di potenza dei beni prodotti. L'evoluzione dell'edilizia è stata strettamente legata alle rivoluzioni industriali, che hanno segnato il passaggio da tecniche artigianali a metodi di produzione sempre più efficienti e tecnologici. Prima del XIX secolo, le tecniche costruttive erano fortemente limitate dai materiali disponibili, come legno, pietra e malta di calce.

La prima rivoluzione industriale (Industria 1.0), sviluppata tra il 1760 e il 1850²⁸, segnò un punto di svolta grazie all'introduzione del carbone come fonte di energia e alla diffusione delle macchine a vapore. Questo permise la nascita di una produzione edilizia più avanzata, con l'impiego di nuovi materiali come vetro, ghisa e ferro, che resero possibili le prime innovazioni strutturali su larga scala.

Con la seconda rivoluzione industriale (Industria 2.0), tra il 1870 e il 1950²⁹, l'elettricità e il petrolio sostituirono progressivamente il vapore aumentando l'efficienza e la rapidità della produzione. Questo periodo vide la nascita della catena di montaggio e le prime tecniche di prefabbricazione, che portano a un'accelerazione nella costruzione di edifici. L'acciaio divenne il materiale predominante, consentendo la realizzazione di strutture più leggere e resistenti. La terza rivoluzione industriale (Industria 3.0) definita anche "Rivoluzione digitale"³⁰, ha avuto inizio negli anni 50', segnando l'introduzione di tecnologie avanzate come l'elettronica, l'informatica e Internet. Questi livelli di automazione hanno dato inizio alla "Digital

²⁸ *Rivoluzione industriale*, in "Enciclopedia Treccani", <https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-industriale/>

²⁹ L. Guaragna, *La seconda rivoluzione industriale (1870-1950)*, in "leoneg.it", 2018 <http://www.leoneg.it/archivio/Industrializzazione%20e%20societa%20di%20massa.pdf>

³⁰ Amodiovalerio Verde, *Retail (r)evolution - La terza rivoluzione industriale*, 9 luglio 2019, <https://www.linkedin.com/pulse/retail-revolution-la-terza-rivoluzione-industriale-valerio-verde/>

Transformation” delle fabbriche, integrando sistemi automatizzati nei processi produttivi. A differenza dell’Industria 2.0, incentrata sull’aumento della quantità, questa nuova fase ha posto maggiore enfasi sulla qualità della produzione, ottimizzando l’efficienza e la precisione nei vari settori industriali. Durante questa fase, la connessione tra macchine e computer è diventata essenziale, permettendo la generazione di modelli 3D innovativi attraverso software avanzati per migliorare la precisione nella produzione e costruzione. L’uso delle macchine a controllo numerico (CNC) permise una lavorazione più precisa dei materiali, mentre l’integrazione tra software CAD (Computer-Aided Design) e CAM (Computer-Aided Manufacturing) ottimizzò la progettazione e la produzione di elementi costruttivi.

L’attuale rivoluzione industriale, nota come Industria 4.0, sta trasformando il settore delle costruzioni attraverso la digitalizzazione e l’introduzione di tecnologie avanzate. Questa fase segna l’unione tra il mondo fisico e quello digitale, grazie all’utilizzo di sistemi cyber-fisici, intelligenza artificiale e connessione in rete tra macchine e operatori. Il concetto di Costruzione 4.0 riflette l’adozione di strumenti innovativi come la stampa 3D, il Building Information Modeling (BIM) e l’Internet of Things (IoT). Il BIM, in particolare, consente una gestione integrata del progetto, migliorando la pianificazione, l’efficienza energetica e il controllo della sicurezza in cantiere. L’IoT permette la raccolta e l’analisi di dati in tempo reale, ottimizzando il monitoraggio delle risorse e la gestione del ciclo di vita degli edifici³¹.

Nonostante il grande potenziale della digitalizzazione nel settore edilizio, molte delle tecnologie disponibili non sono ancora pienamente adottate. L’automazione dei processi costruttivi è ancora in fase di sviluppo³² e richiede ulteriori investimenti per raggiungere una diffusione capillare. Tuttavia, la crescente necessità di ridurre l’impatto ambientale e di migliorare l’efficienza produttiva spinge sempre più aziende a integrare questi strumenti, aprendo la strada a un’era di costruzioni più sostenibili, intelligenti e interconnesse. L’Industria 4.0 ha dimostrato come l’uso di strumenti digitali possa trasformare l’edilizia, migliorando non solo la produttività e la qualità delle costruzioni, ma anche la sostenibilità ambientale. La crescente consapevolezza dell’impatto negativo dei materiali tradizionali ha reso indispensabile la ricerca di alternative più ecologiche, come la costruzione in terra, che si integra perfettamente nel nuovo paradigma digitale dell’edilizia. Oggi, le tecnologie di produzione digitale, tra cui la stampa 3D e la robotica, sono sempre più utilizzate per innovare il settore. Tuttavia, l’adozione della produzione digitale per la costruzione in terra cruda ha dimostrato di essere una valida alternativa alla costruzione tradizionale in cemento³³. La digitalizzazione rappresenta dunque una tappa fondamentale nell’evoluzione delle costruzioni, combinando efficienza produttiva, sostenibilità e nuove possibilità progettuali.

In un’epoca in cui l’innovazione tecnologica è la chiave per la competitività, la digitalizzazione del settore edile europeo è inevitabile e fondamentale per affrontare le sfide future, garantendo edifici più sicuri, efficienti e rispettosi dell’ambiente.

31 Maskuriy, R.; Selamat, A.; Ali, K.N.; Maresova, P.; Krejcar, O. *Industry 4.0 for the Construction Industry—How Ready Is the Industry?* Appl. Sci. 2019, 9, 2819. <https://doi.org/10.3390/app9142819>

32 Ibidem.

33 F. Pacheco-Torgal, Said Jalali, Earth construction: *Lessons from the past for future eco-efficient construction, Construction and Building Materials*, Volume 29, 2012, Pages 512-519, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

2.2 Evoluzione tecnologica della costruzione in terra

In questo scenario, anche la costruzione in terra cruda ha subito una notevole evoluzione, grazie all'introduzione di strumenti avanzati come il controllo numerico computerizzato (CNC), la prefabbricazione e la stampa 3D. Questi strumenti hanno permesso di superare molti dei limiti tradizionali di questo materiale, rendendolo una soluzione moderna, sostenibile e competitiva. Per lungo tempo, l'uso della terra cruda è stato limitato da processi artigianali. Oggi, l'innovazione in questo ambito si sviluppa lungo tre principali direttrici:

- Meccanizzazione delle tecniche tradizionali, che consente di aumentare la produttività e migliorare la qualità dell'edificato;
- Prefabbricazione e robotica, che ottimizzano precisione ed efficienza nei processi costruttivi;
- stampa 3D, che apre a nuove possibilità formali e architettoniche, riducendo i tempi di costruzione e la necessità di manodopera specializzata

2.2.1 La meccanizzazione della costruzione in terra cruda

L'adozione della meccanizzazione nella lavorazione della terra rappresenta un'alternativa ecologica al cemento, contribuendo alla riduzione delle emissioni di CO₂ e favorendo un'edilizia più sostenibile. I primi tentativi di meccanizzare la costruzione in terra risalgono a quasi un decennio fa, ma negli ultimi quattro anni si è registrato un notevole incremento della ricerca e dello sviluppo di tecniche di produzione avanzata nel settore.

Una delle principali innovazioni in questo ambito è proprio l'introduzione sistematica dei macchinari. In passato, la lavorazione della terra richiedeva un ingente impiego di manodopera, tempi di produzione lunghi e una qualità costruttiva spesso variabile. Oggi, l'utilizzo di attrezzature meccanizzate ha rivoluzionato il settore, rendendo il processo più rapido e preciso, senza compromettere l'integrità strutturale degli edifici.

Nella tecnica dell'adobe, ad esempio, per la formazione dei blocchi di mattone crudo si utilizzano sia macchine ad azione manuale, come la CETA-Ram block press, sia macchine semiautomatiche prodotte da aziende di tutto il mondo. Tra queste, l'americana AECT produce impianti in grado di realizzare fino a 480 blocchi all'ora³⁴, mentre la Vermeer ha sviluppato una macchina capace di battere un blocco di 7 × 14 × 4 pollici ogni 15 secondi³⁵. Sul mercato esistono numerosi modelli, tutti progettati per semplificare e velocizzare le operazioni di costruzione, riducendo i tempi di lavoro e aumentando la regolarità dei manufatti.

Negli ultimi dieci anni, nella tecnica della terra battuta, si è affermato l'impiego di compattatori pneumatici, costipatori a lastra vibrante e compattatori vibranti. Questi strumenti vengono utilizzati per compattare strati di terra umida all'interno di casseri prefabbricati, consentendo la realizzazione di elementi modulari ad alta precisione e con una qualità

34 AECT 2500HD compressed earth block machine, fonte:<https://aectearthblock.com/2500hd-series>

35 Elbert Chu, *How To Make Bricks Out Of Dirt*, in "popular science", 30 maggio 2013. <https://www.popsi.com/technology/article/2013-05/building-blocks/>

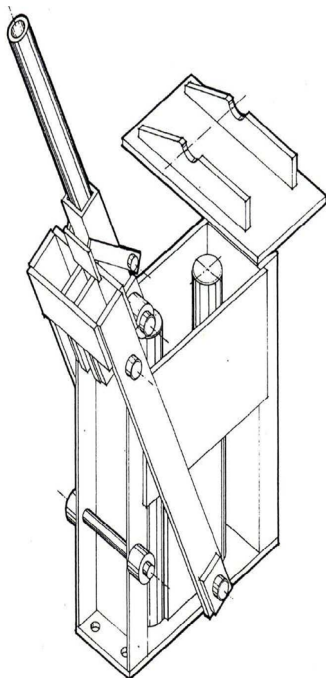


Fig. 9 Macchina manuale Ceta Ram
Fonte: <https://construyediferente.com/wp-content/uploads/2017/09/The-CETA-RAM-Block-Press.pdf>



Fig. 10 Macchina semi automatica per blocchi ceb. Fonte: <https://www.popsci.com/technology/article/2013-05/building-blocks/>

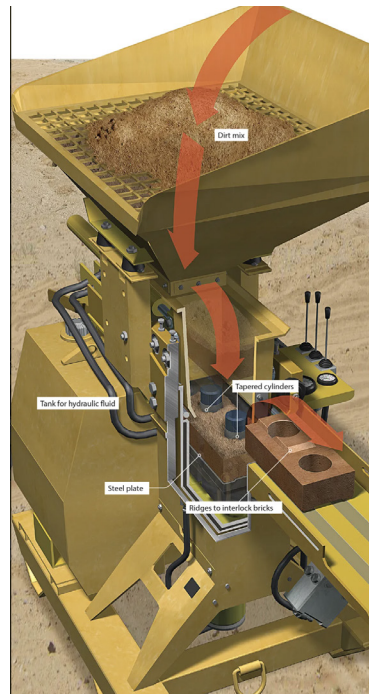


Fig. 11 Rappresentazione del funzionamento della macchina semi automatica per blocchi ceb. Fonte: <https://www.popsci.com/technology/article/2013-05/building-blocks/>

costruttiva superiore.

Il Ram II G, prodotto dalla ditta Atlas-Copco, è particolarmente adatto grazie a una caratteristica speciale che impedisce la rotazione della testa, permettendo così un utilizzo efficiente anche con teste quadrate. Tutti i pestelli illustrati richiedono una pressione di 6 bar e un flusso d'aria compreso tra 0,4 e 0,9 m³/min. A causa dei loro elevati costi e dell'infrastruttura necessaria per il loro funzionamento, questi strumenti vengono utilizzati solo per progetti edilizi di grandi dimensioni.

Un pestello elettrico vibrante è stato sviluppato presso il Building Research Laboratory (BRL) e prodotto dall'azienda Heuser. Il suo motore ha una frequenza compresa tra 1000 e 1200 cicli al minuto. La parte più innovativa di questo pestello vibrante è la sua base sagomata in modo speciale, che gli consente di muoversi autonomamente all'interno della cassaforma mentre compatta la terra. Questo strumento è in grado di compattare strati di terra sciolta di 7 cm di spessore³⁶.

Nella pratica, si possono utilizzare anche compattatori pneumatici normalmente impiegati in metallurgia, purché leggeri (non oltre 15 kg), poco potenti (massimo 50 bar), con una corsa di 20 cm e una frequenza d'impatto elevata, fino a 70 colpi al minuto, per non danneggiare i casseri.

L'uso di costipatori pneumatici garantisce la realizzazione di pareti più resistenti e uniformi rispetto alla compattazione manuale. Un altro progresso rilevante è rappresentato dai sistemi automatizzati di miscelazione e pompaggio, che permettono di ottenere miscele di terra stabilizzata più omogenee e con migliori proprietà meccaniche, ottimizzando così la durabilità e le prestazioni del materiale.

Tra gli esempi più innovativi di costruzioni realizzate con strumenti meccanizzati si possono citare Casa Rauch e Casa de Tapia, entrambi edifici residenziali monofamiliari, analizzati in dettaglio nel capitolo successivo.

2.2.2 La prefabbricazione dei materiali in terra cruda

La prefabbricazione è un'altra innovazione fondamentale che sta guadagnando terreno nel campo dell'architettura in terra battuta. Questo approccio offre vantaggi sotto diversi aspetti: riduce i tempi di costruzioni, garantisce maggiore precisione e qualità rispetto alla costruzione in loco e permette di minimizzare lo spreco di materiali, ottimizzando le risorse.

Uno dei primi esempi concreti di prefabbricazione in terra cruda risale agli anni '80 con il gruppo Craterre³⁷ che ha sviluppato tecniche moderne per la produzione di mattoni stabilizzati in terra cruda (SSB) per la realizzazione di due progetti fondamentali: l'area residen

³⁶ Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Third and Revised edition., Birkhäuser, 2013, pag. 55. <https://doi.org/10.1515/9783034608725>.

³⁷ Dal 1979, CRAterre, il Centro Internazionale per le Costruzioni in Terra, si impegna nel riconoscere e promuovere l'uso della terra come materiale da costruzione per affrontare le sfide ambientali. Fondato il 6 febbraio 1979 da Patrice Doat, Alain Hays, Hugo Houben, Silvia Matuk e François Vitoux, negli anni '80 era noto come "Centro di Ricerca e Applicazione della Terra" prima di assumere la denominazione attuale. <https://craterre.org/>



Fig. 12 Costruzione di un muro in terra battuta con compattore pneumatico <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/retrospective-martin-rauch>

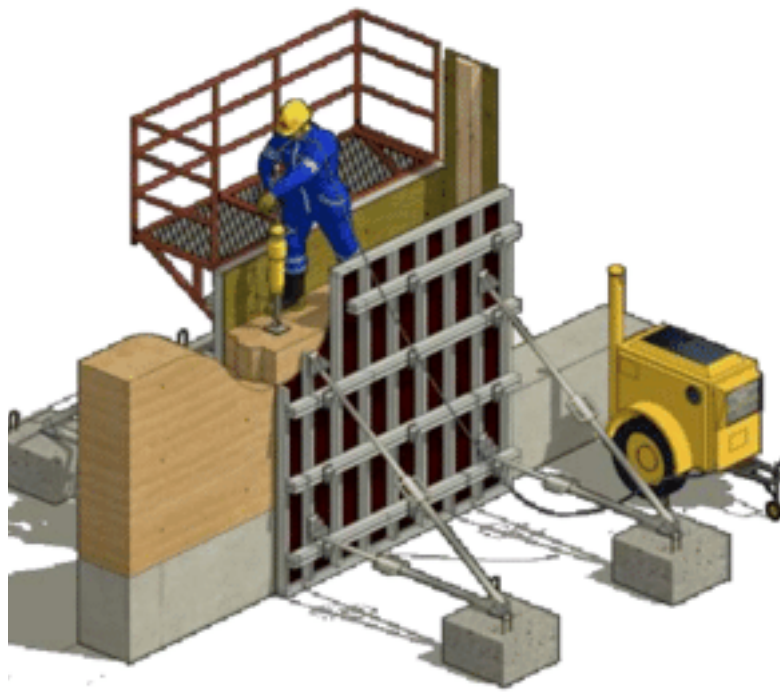


Fig. 13 Costruzione di un muro in terra battuta con compattore pneumatico <https://www.parc-livradois-forez.org/preserve/architecture/le-pise/la-technique-du-pise/>

ziale Domaine de la Terre a Villefontaine e l'Isle d'Abeau³⁸.

Nel 2011, Martin Rauch, con la sua azienda Lehm Ton Erden, ha introdotto **Roberta**³⁹, una macchina semi-automatica per la produzione di blocchi in terra battuta. Si tratta di una linea di produzione composta da quattro componenti principali: cassaforma, trasportatore, macchina di compattazione e macchina di taglio. La cassaforma, lunga 20 m e alta fino a 2,8 m, viene montata e smontata semi-automaticamente. La miscela di terra viene trasportata automaticamente per garantire una distribuzione uniforme e compattata in strati di 12 cm. Ogni tre strati, viene aggiunta malta cementizia per aumentare la resistenza. Dopo lo smontaggio della cassaforma, la macchina da taglio verticale semiautomatica divide il muro in pannelli più piccoli, che vengono poi imballati e trasportati nei cantieri⁴⁰. Un'applicazione concreta di questa tecnologia è il Ricola Herbs Centre in Svizzera (approfondito nel capitolo 3), realizzato con pannelli prefabbricati in terra battuta.

Nel 2020, la start-up australiana Form Earth⁴¹ ha presentato un ulteriore passo avanti con un sistema di prefabbricazione portatile e quasi autonomo, capace di produrre pannelli murari direttamente in loco. Il sistema standard crea un pannello di parete di 2,0 m x 2,7 m e può essere regolato per i requisiti desiderati di diversi progetti⁴². Questo ha segnato un'evoluzione rispetto alla macchina semi-automatica Roberta, eliminando la necessità di taglio, stoccaggio e trasporto.

2.2.3 Sistemi Innovativi e Robotica per la costruzione in terra cruda

I primi tentativi di automazione imitavano le linee di produzione industriali tradizionali, meccanizzando i processi ma senza sfruttare appieno le potenzialità della robotica e della digitalizzazione. Tuttavia, le esigenze dell'architettura contemporanea hanno spinto lo sviluppo verso soluzioni più avanzate, capaci di creare geometrie complesse e personalizzate.

Un esempio emblematico è il progetto di ERNE AG Holzbau, che ha combinato robotica e terra cruda per produrre elementi prefabbricati con sistemi di battitura a sette gradi di libertà e può lavorare su qualsiasi forma fattibile fornita da un modello CAD/BIM.

Questa tecnologia consente di realizzare componenti su misura con elevata precisione, migliorando l'efficienza della costruzione.

38 Yin, X.; Guo, C.; Sun, B.; Chen, H.; Wang, H.; Li, A. *The State of the Art in Digital Construction of Clay Buildings: Reviews of Existing Practices and Recommendations for Future Development*. Buildings 2023, 13, 2381. <https://doi.org/10.3390/buildings13092381>

39 *Innovazioni*, in "ERDEN", <https://www.erden.at/Innovations>

40 Mohamed Gomaa, Sascha Schade, Ding Wen Bao, Yi Min Xie, *Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect*, Journal of Cleaner Production, Volume 398, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>

41 Mohamed Gomaa, Sascha Schade, Ding Wen Bao, Yi Min Xie, *Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect*, Journal of Cleaner Production, Volume 398, 2023, 136569, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>.

42 Ibidem.



Fig. 14 Macchina Roberta. <https://cradle-mag.de/artikel/martin-rauch-einzigartige-projekte-aus-stampflehm.html>



Fig. 15 Macchina di taglio verticale. <https://cradle-mag.de/artikel/martin-rauch-einzigartige-projekte-aus-stampflehm.html>



Fig. 16 Sistema di prefabbricazione Form Earth. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623007278?via%3Dihub>



Fig. 17 Sistema di prefabbricazione Form Earth. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623007278?via%3Dihub>

Il braccio robotico è posizionato su una pista lineare⁴³ che consente di muoversi entro un'area di lavoro di circa 15 m x 6 m x 6 m. L'effetto finale è quella di un costipatore pneumatico di Mannesmann Demag modificata per essere collegata al robot. La piastra di compattazione è di forma quadrata e realizzata in acciaio resistente all'abrasione con una dimensione di 80 mm x 80 mm⁴⁴. Per proteggere il robot dalle vibrazioni meccaniche e dalle forze eccessive emesse dal compattatore, è stato installato uno smorzatore di massa sintonizzato⁴⁵.

Per massimizzare il controllo di qualità e ridurre il rischio di guasti, il robot utilizza un costipatore pneumatico che ha dimostrato affidabilità nella produzione convenzionale di terra battuta. Altri metodi di compattazione come i compattatori a piastra vibrante e i vibratori elettrici rotanti saranno presi in considerazione per progetti futuri.

Gli studi iniziali del processo di produzione hanno mostrato che la fase di battitura della terra è la parte più dispendiosa in termini di tempo del processo. Pertanto, ERNE ha sviluppato un metodo per ottimizzare l'intero processo produttivo, progettando ogni fase, dalla gestione dei materiali alla logistica, in modo che il compattatore robotico lavori senza interruzioni, mentre le altre attività supportano il processo di compattazione.

Si prevede che ciò porti alla massima produttività possibile dell'intero ciclo produttivo, che prevede cinque fasi⁴⁶:

1. Assemblaggio della cassaforma,
2. Deposito del materiale
3. Costipamento robotico
4. Sformatura
5. Trasporto degli elementi completati per lo stoccaggio

Un'applicazione concreta di questo sistema è l'ampliamento dell'edificio per uffici di ERNE AG Holzbau in Svizzera, dove la terra battuta viene direttamente estratta dal sito e compattata con l'uso di robot.

43 Mohamed Gomaa, Sascha Schade, Ding Wen Bao, Yi Min Xie, *Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect*, Journal of Cleaner Production, Volume 398, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>

44 Mohamed Gomaa, Sascha Schade, Ding Wen Bao, Yi Min Xie, *Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect*, Journal of Cleaner Production, Volume 398, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>

45 Uno smorzatore di massa sintonizzato è un dispositivo installato in una struttura per prevenire disagi e danni da vibrazioni.

46 Mohamed Gomaa, Sascha Schade, Ding Wen Bao, Yi Min Xie, *Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect*, Journal of Cleaner Production, Volume 398, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569>



Fig. 18 Sistema di prefabbricazione robotica ERNE. Fonte: https://www.linkedin.com/posts/erne-ag-holzbau_lehmbau-robotik-vorfertigung-activity-6948243066323402752-Rnoe/?originalSubdomain=de



Fig. 19 Sistema di prefabbricazione robotica ERNE. Fonte: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652623007278?via%3Dihub>

In futuro, la combinazione di tecniche di prefabbricazione, robotizzazione e automazione offrirà soluzioni sempre più efficienti.

La terra cruda, grazie alle innovazioni tecniche, potrà quindi svolgere un ruolo fondamentale nell'architettura del futuro, unendo sostenibilità, estetica e funzionalità.

2.4 Stampa 3D e Digitalizzazione

La stampa 3D in cemento è ormai una realtà diffusa, mentre la **stampa 3D** in terra è ancora poco utilizzata, ma i suoi sviluppi stanno aprendo nuove possibilità nella realizzazione di strutture complesse, senza la necessità di casseforme e riducendo gli sprechi di materiale.

Questa tecnologia si basa su **Fused Deposition Modeling** (FDM)⁴⁷, un processo che deposita strati successivi di materiale a base di terra attraverso un sistema digitale.

Il processo di stampa 3D FDM richiede, la segmentazione del modello digitale in tante sezioni, attraverso un software di slicing, che genera un file di testo con tutti i comandi di movimento. Il sistema di distribuzione della miscela di terra avviene attraverso meccanismi di controllo digitale, come bracci robotici o portali CNC. Questo facilita la deposizione e la formazione di strati uniformi lungo il percorso prestabilito.

Affinché il processo sia efficace, la miscela di terra (composta generalmente da terreno, acqua e additivi organici e inorganici) deve avere proporzioni corrette e additivi adeguati a garantire buone proprietà meccaniche. Inoltre, per ottenere una stampa fluida, l'argilla utilizzata deve soddisfare tre requisiti fondamentali: estrudibilità, costruibilità e lavorabilità variabile nel tempo.

L'estrudibilità assicura che il materiale fluisca senza problemi attraverso il sistema di stampa, evitando aggregazioni o blocchi. La costruibilità garantisce che lo strato superiore di argilla rimanga stabile anche se quello inferiore non si è ancora asciugato o indurito durante l'impilamento. Infine, la lavorabilità variabile nel tempo implica che l'argilla debba mantenere una deformazione minima, anche a velocità di deposizione elevate, e che la transizione dalla fase di stampa a quella di indurimento avvenga entro un limite di tempo specifico, determinato dalla velocità di asciugatura del materiale.

Inizialmente la stampa 3D era applicata alla ceramica oggi è impiegata anche su scala architettonica, aprendo nuove possibilità costruttive. Due approcci principali dominano il settore:

1. **Stampa di blocchi prefabbricati**, che vengono poi assemblati in cantiere.
2. **Stampa in loco dell'intera struttura**, eliminando la necessità di trasporto e riducendo i tempi di costruzione.

⁴⁷ Yin, X.; Guo, C.; Sun, B.; Chen, H.; Wang, H.; Li, A. *The State of the Art in Digital Construction of Clay Buildings: Reviews of Existing Practices and Recommendations for Future Development*. Buildings 2023, 13, 2381. <https://doi.org/10.3390/buildings13092381>



Fig. 20 Stampa in corso con Big delta 12mt. Fonte: <https://www.3dwasp.com/il-muro-di-terra-e-paglia-alle-soglie-dei-3-metri/>

Progetti innovativi come il Ceramic Constellation Pavilion⁴⁸, dimostrano l'efficacia della stampa 3D per la creazione di piccoli elementi modulari. Un altro esempio innovativo è stato il progetto Pylos, realizzato presso i laboratori dell'Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), dove sono stati progettati moduli di parete in terra cruda per resistere

a sforzi di compressione consistenti. Nel 2018, l'azienda italiana WASP ha inaugurato GAIA⁴⁹, il primo modulo abitativo sperimentale stampato attraverso la tecnologia Crane Wasp in terra cruda stabilizzata con lolla di riso, dimostrando il potenziale di questa tecnologia per un'edilizia sostenibile.

L'evoluzione delle tecnologie di prefabbricazione, robotica e stampa 3D sta trasformando la costruzione in terra cruda da una tecnica tradizionale a un sistema innovativo, efficiente e sostenibile. Sebbene l'intervento umano sia ancora necessario in alcune fasi, il futuro punta verso un'automazione completa, supportata da intelligenza artificiale, IoT e sistemi di monitoraggio avanzati.

L'integrazione di queste tecnologie non solo migliorerà la qualità delle costruzioni, ma renderà possibile l'adozione della terra cruda su scala industriale, combinando sostenibilità, estetica e funzionalità in modo rivoluzionario.

Si propone di seguito un approfondimento su Lehm Ton Erde, impresa specializzata nella produzione di pannelli prefabbricati in terra cruda destinati a pareti interne, esterne e pavimentazioni off-site, fondata da Martin Rauch, uno dei principali esperti internazionali nella costruzione in terra battuta, e su WASP, azienda leader nella progettazione e realizzazione di sistemi di stampa 3D, comprese le soluzioni dedicate all'architettura in terra cruda.

L'analisi prende in esame la filosofia aziendale, i processi produttivi e le principali applicazioni di entrambe le realtà.

48 Christian J. Lange, Donn Holohan, Holger Kehne, *Ceramic Constellation Pavilion*, progetto di ricerca - Università di Honk Kong, 2017, https://www.arch.hku.hk/research_project/ceramic-constellation-pavilion/

49 Alberto Chiusoli, *La prima Casa Stampata in 3D generata con la Terra I Gaia*, in "Casa, Comunicati Stampa", 29 settembre 2018 <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>



Fig. 21 Stampa 3D in corso con argilla: l'estrusore deposita strati di materiale per creare strutture architettoniche sostenibili.
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=pf2PTyoRG4E&list=PLKSfMq7r3YolyGxCU8xhfNLVcLH5KMhxT&index=3>

APPROFONDIMENTO CASO STUDIO di **Lehm ton erden**

Anno di fondazione:

1990

Luogo:

Schlins, Austria (AT)

Fondatore:

Martin Rauch

Materiali trattati:

Terra crua

Processo produttivo:

Prefabbricazione

Premi:

New European Bauhaus 2021 - Tecniche, materiali e processi per la costruzione e la progettazione



LUOGHI DI INTERVENTO



Fig. 22 Elaborazione personale dei luoghi di intervento di Lehm Ton Erden

DESCRIZIONE /

Martin Rauch, fondatore e amministratore delegato di Lehm Ton Erde (LTE) a Schlins, Austria, è riconosciuto a livello internazionale come uno dei principali esperti nel campo della costruzione in terra battuta. Nel 1999⁵⁰, Rauch ha fondato Lehm Ton Erde Baukunst, un'impresa dedicata all'edilizia in terra cruda che privilegia l'utilizzo dell'argilla proveniente da materiali di scavo. Il centro operativo e studio attuale, costruito nel 1990, rappresenta una dimostrazione tangibile della conoscenza acquisita da Rauch nel campo della costruzione in terra. Con oltre 35 anni di esperienza, Martin Rauch e il team di LTE hanno realizzato più di 100 progetti, affermandosi come leader del settore.

Negli anni, Lehm Ton Erde ha sviluppato un impianto di prefabbricazione, segnando una svolta significativa nel panorama delle costruzioni sostenibili. Ora, l'azienda si trova in una fase di espansione e innovazione, con l'obiettivo di promuovere la terra battuta come materiale da costruzione di uso comune, rispondendo agli impatti ecologici dell'industria edilizia.

ERDEN, significa "terra", rappresenta il cuore della visione di LTE: un approccio fondato sull'utilizzo di materiali e processi naturali. Mentre Lehm Ton Erde continua a fungere da riferimento globale per tutto ciò che riguarda la terra battuta, ERDEN si pone all'avanguardia nel settore della prefabbricazione, rivoluzionando l'industria delle costruzioni con soluzioni innovative.

Un esempio emblematico di questa visione è la ERDEN Werkhalle, il nuovo stabilimento dedicato alla produzione di elementi prefabbricati in terra battuta. Questo impianto incarna la missione di Lehm Ton Erde: unire tradizione e innovazione per promuovere un'architettura sostenibile e rispettosa dell'ambiente.

/ Il nuovo stabilimento

L'officina Erden, ancora in fase di costruzione, è un progetto pilota composto da un capannone lungo 67 metri e largo fino a 24 metri, dedicato alla prefabbricazione di elementi in terra battuta, e da un'adiacente ala uffici a due piani. Questo progetto rappresenta un esempio unico di architettura su larga scala, realizzata interamente con un sistema ibrido che combina una struttura in legno con un muro in terra battuta lungo 67 metri.

L'officina viene costruita su fondazioni di calcestruzzo. Le pareti in argilla battuta dell'officina sono prodotte in loco e la struttura è una costruzione combinata in legno di travi lamellari e capriate⁵¹.

Il capannone, oltre a essere un prototipo innovativo, è anche un'officina operativa. Integra diverse tecniche di costruzione in terra nella sua struttura e offre uno spazio permanente per le macchine dedicate alla produzione su larga scala di componenti prefabbricati in terra battuta.

La maggior parte delle materie prime utilizzate per la costruzione viene reperita localmente come materiale di scavo. L'energia solare è la principale fonte di calore, utilizzata per attivare i componenti principali dell'edificio e per riscaldare gli ambienti dell'ala uffici.

50 *Our story, our people*, in "ERDEN", <https://www.erden.at/Our-Story>

51 *New Construction: ERDEN Factory Workshop Lehm Ton Erde*, in "Lehm ton erden", <https://www.lehmtonerde.at/en/news/#news236>



Fig. 23 Vista della struttura portante in legno lamellare in fase di montaggio, con intelaiatura a telaio, controventi diagonali e prime fasi della posa delle pareti in terra cruda (pisé), a evidenziare l'integrazione tra materiali naturali e tecniche prefabbricate.

Fonte: <https://baubiologie.de/wissen/baubiologie-magazin/handwerk-im-bau-ausbau/holz-lehm-modern-vereint-kon->



Fig. 24 Particolare del fronte principale in fase di completamento. L'involucro combina tre materiali principali: terra cruda a strati compattati (pisé), struttura lignea a vista e rivestimento in scandole di legno nella parte superiore. Fotografia di Hanno Mackowitz, Fonte: <https://www.erden.at/ERDEN-Werkhalle>

Costruzione parete esterna

- Rivestimento facciata in larice, segato 30 mm
- Listellatura 40 mm
- Contro-listellatura, con camera di ventilazione da 50 mm
- Membrana antivento
- Tavolato grezzo 24 mm
- Legno massiccio da costruzione, con isolamento in lana di pecora da 200 mm
- Pannello a tre strati 27 mm
- Intonaco di argilla con rete in canapa 20 mm

Stratigrafia del sistema di copertura

- Strato di humus leggero 100 mm
- Impermeabilizzazione del tetto
- Tavolato grezzo 30 mm
- Ventilazione posteriore 2 x 140 mm
- Sottotetto
- Tavolato grezzo 24 mm
- Legno massiccio da costruzione, con isolamento in balle di paglia da 240 mm
- Pannello massiccio in legno 30 mm

Costruzione parete esterna

- Intonaco di argilla fine 10 mm
- Legno massiccio da costruzione, con riempimento in argilla leggera da 120 mm
- Legno massiccio da costruzione, con riempimento in argilla leggera da 160 mm
- Listellatura in legno, con riempimento in argilla leggera da 100 mm
- Intonaco di argilla con rete in canapa 20 mm

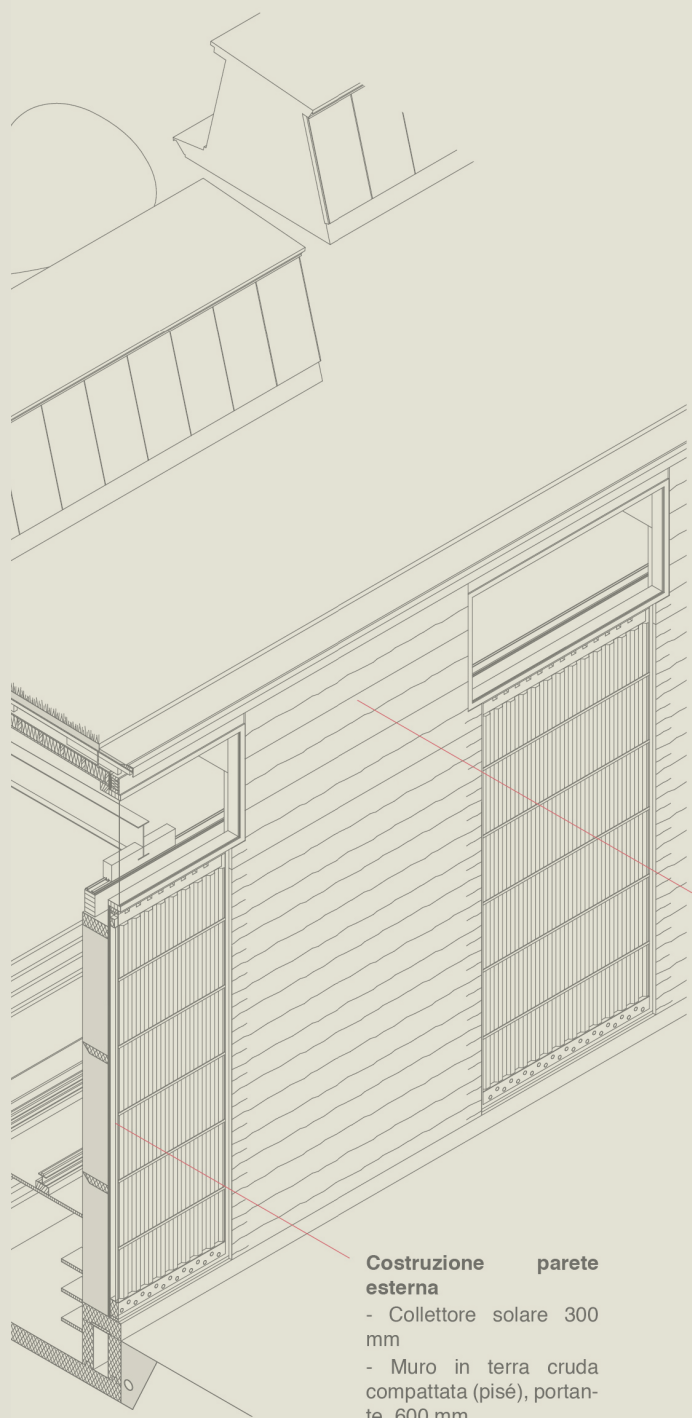
Costruzione parete esterna

- Costruzione del pavimento piano terra (EG)
- Pavimento in calcestruzzo liscio - 150 mm
- Ghiaia compattata 150 mm
- Argilla con tubazioni di riscaldamento 100 mm
- Ghiaia 760 mm
- Argilla con tubazioni di riscaldamento 100 mm

Fig. 25 Spaccato assonometrico con dettagli costruttivi Fonte: <https://www.proholz.at/zuschnitt/87/erden-werkhalle-in-schlins>



IL NUOVO STABILIMENTO



Costruzione parete esterna (tra le finestre superiori)

- Muro in terra cruda compattata, prefabbricato, a strati
- Tra gli strati: pannelli in malta di calce trass 170 mm
- Isolamento in paglia 100 mm
- Telaio reticolare, con riempimento leggero di argilla con sughero 200 mm

Costruzione parete esterna

- Collettore solare 300 mm
- Muro in terra cruda compattata (pisé), portante, 600 mm

La Werkhalle Erden dimostra che è possibile realizzare edifici di grandi dimensioni sfruttando un ciclo naturale e sostenibile, fornendo un esempio concreto e significativo per il futuro dell'architettura ecologica⁵².

APPROCCIO UTILIZZATO

L'azienda si pone l'obiettivo di sviluppare costruzioni che, dopo un secolo, possano tornare alla natura senza generare alcun tipo di rifiuto, operando in armonia con i cicli di vita naturali. Questo approccio si basa sull'uso minimo indispensabile di energia e sull'impiego di materiali economici e facilmente reperibili localmente, come la terra prelevata direttamente dagli scavi del sito di costruzione.

Un aspetto fondamentale della filosofia aziendale è il perfezionamento tecnico e logistico del processo costruttivo con la terra cruda, al fine di renderlo accessibile su scala globale. Questo mira a migliorare le condizioni abitative di ampie fasce di popolazione, favorendo un'edilizia sostenibile e rispettosa dell'ambiente⁵³.

SISTEMA DI PRODUZIONE:

on site

La produzione in loco offre la possibilità di utilizzare materiale locale, a volte anche lo stesso terreno scavato. Le pareti sono monolitiche e concepite senza giunti di dilatazione. Durante il primo periodo di essiccazione, subito dopo lo smontaggio della cassaforma, la superficie in terra battuta si presta al ritocco e alla rifinitura.

off site

La prefabbricazione nelle costruzioni in terra è una reazione all'odierno processo di costruzione convenzionale, in cui spesso non c'è spazio per la produzione in loco, poiché il tempo è breve e la manodopera è costosa. L'evoluzione e lo sviluppo della tecnica della terra prefabbricata migliorano l'efficienza del cantiere, la programmazione diventa esattamente calcolabile e rende i progetti più fattibili. Un tale processo consente una produzione indipendente dalle condizioni atmosferiche, anche perché il processo di essiccazione avviene interamente nel capannone di produzione: il coordinamento della costruzione in loco è quindi più semplice e prevedibile. Questa combinazione consente un adattamento ottimale ai processi edilizi industrializzati e ha il potenziale per essere ottimizzata e razionalizzata attraverso sistemi modulari. Nel 2011 Lehm Ton Erden sviluppa una macchina di prefabbricazione (Roberta)⁵⁴ per lo speronamento in linea di produzione in ambiente industriale.

Tutti gli elementi fino a 7000kg e con grande spessore possono essere trasportati e messi in opera con una gru, purché i cantieri siano facilmente accessibili. Nonostante la prefabbricazione industriale, è possibile ottenere un alto grado di individualità attraverso i necessari lavori di dettaglio nel capannone di produzione, che consentono un'esecuzione flessibile e

52 *ERDEN Werkhalle*, in "ERDEN". <https://www.erden.at/ERDEN-Werkhalle>

53 *Lehm ton erde*, in "IoArch 109" gennaio / febbraio 2024". https://issuu.com/redazioneioarch/docs/ioarch_109_gennaio_2024

54 *Innovations*, in "ERDEN". <https://www.erden.at/Innovations>



Fig. 26 Immagine dell'interno dello stabilimento ERDEN - fotografia di Hanno Mackowitz
<https://www.erden.at/ERDEN-Werkhalle>

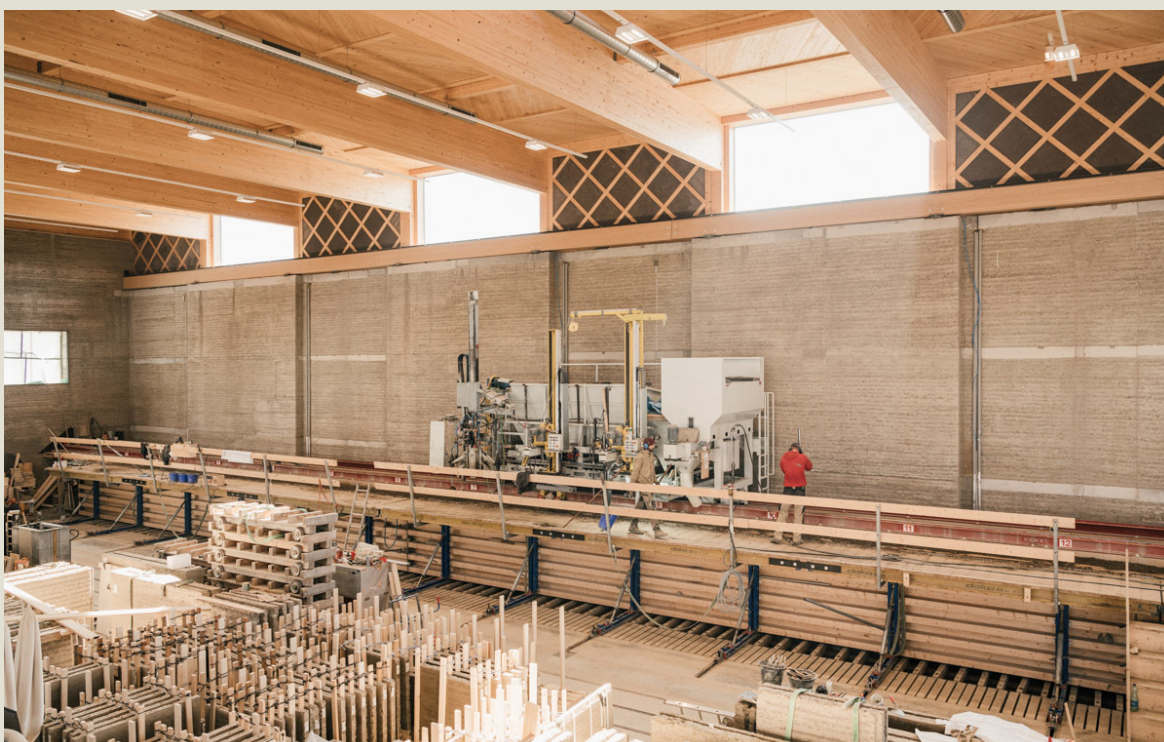


Fig. 27 Immagine di Roberta nella nuovo stabilimnto ERDEN. <https://www.erden.at/ERDEN-Werkhalle>

variabile. Inoltre, le combinazioni con strutture a telaio in legno o cemento si sono dimostrate molto efficienti. A causa delle proprietà plastiche del terriccio, le giunzioni tra gli elementi prefabbricati possono essere ritoccate senza problemi, rendendole non più visibili. Il sistema costruttivo prefabbricato può quindi produrre anche grandi pareti contigue dall'aspetto monolitico⁵⁵.

COSTO

I costi di costruzione e dei prodotti prefabbricati dipendono dalle dimensioni e dalla complessità del progetto. Paradossalmente, nei Paesi europei, costruire con materiali naturali reperibili localmente può risultare più costoso rispetto all'utilizzo di materiali convenzionali. Questo fenomeno è attribuibile a diversi fattori, tra cui il costo elevato della manodopera.

MATERIALI E COMPONENTI

L'azienda Lehm ton erde si occupa di costruzione in terra cruda, in particolare in terra battuta.

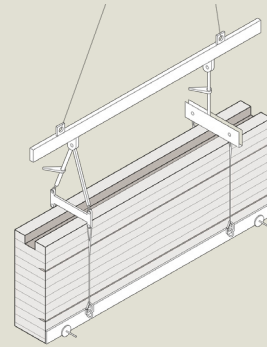
I prodotti prefabbricati in azienda sono:

1. Pareti esterne (ERDEN WALLS)
2. Pareti interne (ERDEN Interior Lining)
3. Pavimenti (ERDEN Rammed Earth floor)

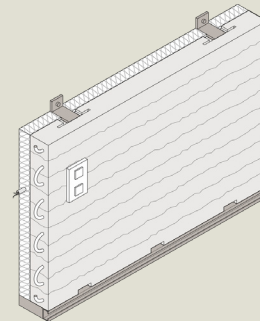
⁵⁵ *Muri in terra battuta*, in "lehm ton erde". <https://www.lehmtonerde.at/en/products/product.php?aID=70>



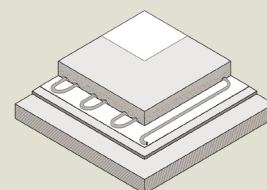
1. Pareti esterne
ERDEN WALLS



2. Pareti interne
ERDEN Interior Lining



3. Pavimenti
ERDEN Rammed Earth Floor



1. Pareti esterne - Erden Wall

I muri ERDEN sono componenti portanti realizzati su ordinazione, caratterizzati da due superfici finite e la possibilità di integrare sistemi di isolamento, riscaldamento o raffreddamento. Questi elementi possono essere facilmente combinati con isolanti tradizionali utilizzando metodi di costruzione convenzionali, offrendo al contempo l'opzione di un isolamento interno personalizzato per rispondere a specifiche esigenze progettuali.

Caratteristiche

Stabilità - Gli elementi della parete sono progettati per incastrarsi come mattoncini. La presenza di canalature assicura una rigida stabilità su tutta la parete.

Capacità Portante - La terra battuta può essere utilizzato sia come elemento strutturale che come rivestimento di facciata.

Superficie - Le pareti ERDEN hanno una superficie più fine o grezza a seconda del loro utilizzo. Possono essere colorate con argilla o sabbia naturale e le superfici interne possono essere rivestite con un'emulsione di caseina naturale per evitare la formazione di polvere.

Controllo erosione - L'erosione è un fenomeno naturale che si verifica in particolare sul lato esterno della parete. Difatti, la parete viene integrata con un sistema di controllo dell'erosione, che nel tempo enfatizza il carattere naturale del materiale.

Forma - Gli elementi ERDEN non producono solo pareti piatte e minimali. Bordi angolari, nicchie e altri intarsi possono essere integrati nei design per creare spazi e caratteristiche unici.

/ Costo: a partire da 900 Euro/m² ⁵⁶

I costi dipendono dalla quantità, dalle dimensioni, dalla complessità e dalla posizione del muro. Per fornire un preventivo più accurato, è necessario disporre di informazioni dettagliate sul progetto.

Il calcolo accurato dei costi dipende da diversi fattori tra cui:

- Posizione del progetto attuale
- Accesso al sito di installazione
- Accessibilità delle pareti all'interno dell'edificio
- Tipo di fondazioni
- Superficie delle pareti
- Scelta dei dettagli costruttivi degli angoli
- Quantità di servizi e impianti richiesti
- Connessione tra pavimento e pareti

⁵⁶ Lehm ton erde, *Rammed Earth Walls from 100% Erde*, in "ERDEN". <https://cloud.lehmtonerde.at/index.php/s/R2FqNXn9o347wRD/download>



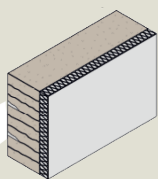
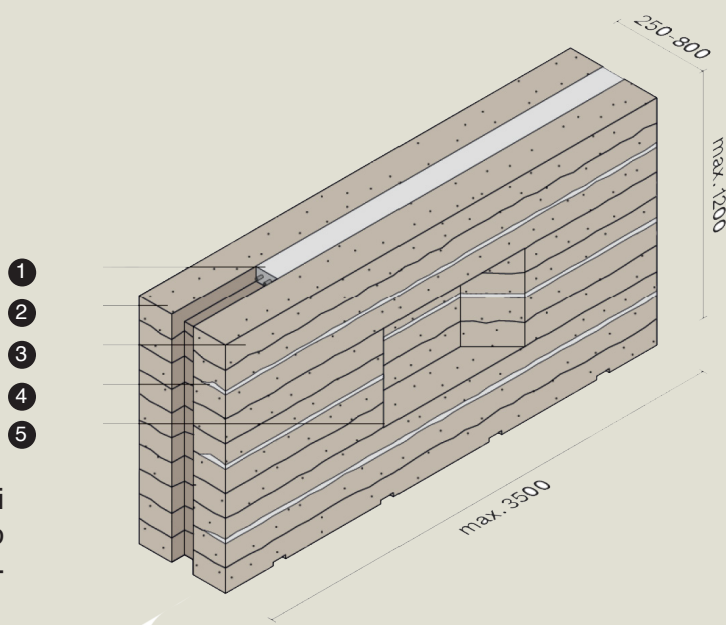
PROCESSO DI COSTRUZIONE e CICLO DI VITA pareti esterne - ERDEN WAL



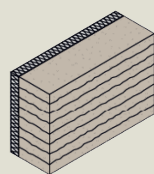
ERDEN WALL

1. Stabilità
2. Capacità Portante
3. Superficie
4. Controllo erosione
5. Forma

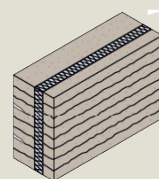
I muri ERDEN sono compatibili con isolanti tradizionali e possono includere isolamento interno su misura.



Isolamento lato interno



Isolamento esterno lato



Isolamento interno integrato

2. Pareti interni - ERDEN lining wall

I pannelli Erden Lining Wall rappresentano una soluzione di rivestimento per pareti interne esistenti. Ad esempio, in una casa in legno, l'installazione dei pannelli ERDEN Wall consente di mitigare le temperature estreme durante la giornata, grazie all'elevata massa termica. Inoltre, le pareti possono essere integrate con sistemi di tubazioni per il riscaldamento o il raffreddamento, garantendo un comfort termico ottimale⁵⁷.

Stratigrafia:

Sottostruttura e piastra di base - Per distribuire il carico del muro è necessario una piastra di base e una sottostruttura dietro i pannelli di terra per ancorarli. Questi elementi strutturali vengono installati insieme al rivestimento in terra.

Isolamento - Nello spazio dietro i pannelli di terra, è possibile aggiungere un ulteriore strato di isolamento tra la sottostruttura. La lana di pecora offre un buon isolamento termico e una buona protezione acustica tra gli ambienti.

Finitura - I pannelli di rivestimento ERDEN sono lucidati e rifiniti con un'emulsione di caseina. La soluzione naturale idrosolubile conferisce alla terra uno strato protettivo liscio che impedisce la formazione di polvere, mantenendo al contempo tutti i benefici climatici della terra.

Riscaldamento integrato - Il riscaldamento radiante idronico può essere integrato nei pannelli murali e si abbina alle prestazioni della terra battuta. La terra accumula il calore dai tubi e lo rilascia gradualmente, creando un clima interno confortevole.

Sistema di impianti - I servizi meccanici ed elettrici possono essere integrati facilmente nei pannelli di terra. I conduttori elettrici o le cavità per l'illuminazione possono essere progettati e incorporati già nella fase di progettazione.

/ Costo: -

Il prezzo dipende da diversi fattori tra cui:

- Posizione del progetto attuale
- Accesso al sito di installazione
- Accessibilità delle pareti all'interno dell'edificio
- Tipo di fondazioni
- Superficie delle pareti
- Scelta dei dettagli costruttivi degli angoli
- Quantità di servizi e impianti richiesti
- Connessione tra pavimento e pareti

⁵⁷ Lehm ton erden, *Interior Lining from 100% Earth*, in "ERDEN". <https://cloud.lehmtonerde.at/index.php/s/CQYGTXNAz3H9MW6/download>



PROCESSO DI COSTRUZIONE pareti esterne - LINING WALL



ERDEN lining WALL

1. Sottostruttura e piastra di base
2. Isolamento
3. Finitura
4. Riscaldamento integrato
5. Sistemi di impianti

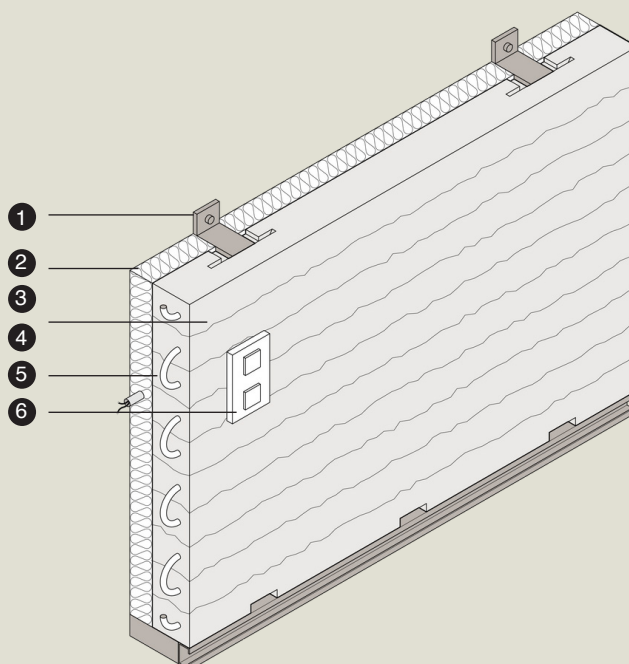


fig. 30 Processo di costruzione dell'Erden lining wall. Fonte: <https://cloud.lehmtonerde.at/index.php/s/kKxBH2ArN-GHYryX?dir=/&openfile=true>

3. / Pavimenti - Pavimento Erden

I pavimenti ERDEN sono personalizzabili, questo permette di rispondere a specifiche esigenze progettuali. Possono essere realizzati con riscaldamento a pavimento integrato, isolamento acustico, lucidatura e sigillatura, garantendo comfort e funzionalità.

Grazie alla loro versatilità, possono essere combinati con sistemi di isolamento tradizionali utilizzando metodi di costruzione convenzionali.

I pavimenti ERDEN in terra battuta offrono una regolazione naturale della temperatura e dell'umidità interna, migliorando il comfort abitativo. Grazie alla loro elevata massa termica, attenuano le variazioni di temperatura tra le ore più calde e più fredde della giornata. Inoltre, la capacità della terra di immagazzinare umidità consente agli ambienti interni di mantenere un livello stabile intorno al 55%, ideale per il benessere e la salute respiratoria. Questi pavimenti richiedono una manutenzione simile a quella di un pavimento in legno massello. Gli interventi aggiuntivi o ritocchi possono essere facilmente effettuati, garantendo una lunga durata e mantenendo la loro funzionalità ed estetica nel tempo.

Sono realizzati al 100% in terra, senza l'aggiunta di cemento o sostanze tossiche, i pavimenti ERDEN sono completamente riciclabili. Possono essere smantellati, frantumati e riutilizzati per creare nuovi pavimenti o, a fine vita, restituiti direttamente alla terra senza generare rifiuti o impatti ambientali negativi.

Grazie alla tecnologia e ai materiali impiegati, i pavimenti ERDEN sono ideali anche per l'installazione in edifici esistenti, garantendo piena compatibilità con strutture e componenti edilizi standard⁵⁸.

Stratigrafia:

Sigillatura - Dopo una levigatura fine, il pavimento ERDEN viene sigillato con un'emulsione di cera di palma. Ciò rende il pavimento ancora più resistente.

Lucidatura - I nostri pavimenti ERDEN vengono lucidati dopo l'installazione. Ciò crea una superficie simile a un pavimento in graniglia. Le pietre grezze nella miscela di terra vengono levigate e diventano visibili.

Terra battuta - La miscela di terra sciolta viene posizionata su un sottofondo rigido e compattata fino a raggiungere uno spessore compreso tra 70 e 120 millimetri.

Riscaldamento integrato - Se lo si desidera, l'ERDEN Floor può essere dotato di un sistema di riscaldamento. Ciò consente alla massiccia base in terra di riscaldarsi e garantisce un clima interno confortevole.

Isolamento acustico - La costruzione di ERDEN Floors varia a seconda delle esigenze. In alcuni casi, l'isolamento acustico da impatto è un vantaggio. Questo viene installato tra il componente strutturale e la miscela di terra.

Sottostruttura - Un pavimento ERDEN richiede un rinforzo del carico e un sottopavimento rigido. Può essere in legno, cemento o terra.

L'approccio di Lehm Ton Erden dimostra come la combinazione di tradizione costruttiva e innovazione tecnologica possa trasformare la terra cruda in un materiale competitivo e sostenibile, aprendo la strada a un'edilizia capace di coniugare efficienza produttiva, qualità architettonica e pieno rispetto dei cicli naturali. Di seguito si prosegue con l'esplorazione delle innovazioni nella costruzione in terra cruda.

⁵⁸ Lehm ton erden, *Rammed earth floors from 100% earth*, in "ERDEN", <https://cloud.lehmtonerde.at/index.php/s/CQYGTxNAz3H9MW6/download>



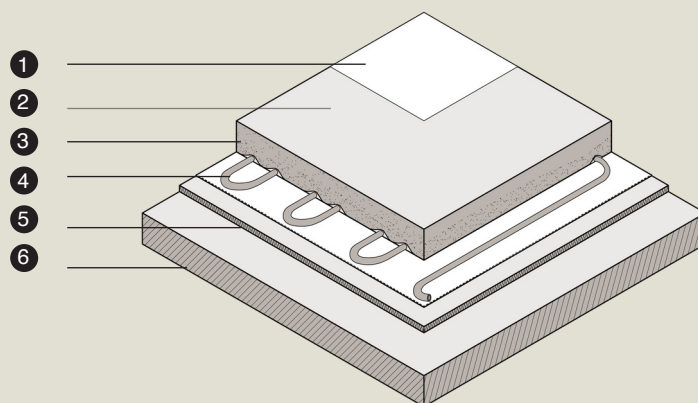
PROCESSO DI COSTRUZIONE pareti esterne - LINING WALL



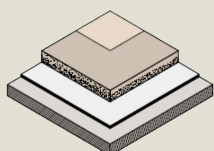
Fig 31. Processo di costruzione e Ciclo di vita di Pavimento Erden.
<https://www.erden.at/Stampflehmboden>

Pavimento ERDEN

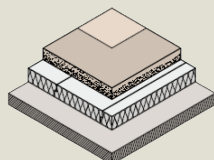
1. Sigillatura
2. Lucidatura
3. Terra battuta
4. Riscaldamento integrato
5. Isolamento acustico
6. Sottostruttura



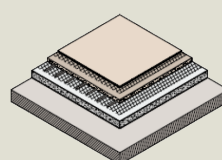
I pavimenti ERDEN sono compatibili con isolamenti tradizionali e possono integrare facilmente riscaldamento e isolamento sotto superficie.



Installazione standardizzata del pavimento



Installazione dell'isolamento sotto superficie



Pavimento leggero con riscaldamento integrato

APPROFONDIMENTO CASO STUDIO di **Wasp**

Anno di fondazione:

2012

Luogo:

Massa Lombarda (Italia)

Fondatore:

Massimo Moretti

Materiali trattati:

plastica bio, argilla, silicone, materiali biocompatibili, legno e alluminio.

Processo produttivo:

stampa 3D

Premi:

2024	Premio Menzione d'Onore per la Sostenibilità ai 3DPI Awards
2022	Premio 3D Pioneers Challenge 2022 – “WASP _ TECLA, the eco-sustainable 3D printed habitat / Dior Concept Store”
2021	Premio Innovatori Responsabili con obiettivo strategico Transizione Ecologica da Regione Emilia-Romagna
2020	Fondazione SYMBOLA premia WASP fra le 100 Italian Architectural Conservation Stories EIT Manufacturing premia WASP nella BoostUp Regional Final, categoria TRANSFORM
2019	Fondazione SYMBOLA premia WASP fra le 100 Italian stories for future building
2018	WASP fra le 100 Europe's Digital Champions secondo il Financial Times
2016	Delta WASP 2040 sul podio nella 3D Printer Guide di 3D Hubs Premio Aquila d'Oro a Massimo Moretti
2015	Premio speciale Maker dell'anno Startup Italia Delta WASP sul podio di 3dhubs.com Crowdy Award per la migliore stampante 3D italiana Delta WASP 2040
2013	Wasp vince Green Award al Printshow di Londra Premio a Massimo Moretti – Imprenditore 2.0



AREE DI DIFFUSIONE DI WASP HUB

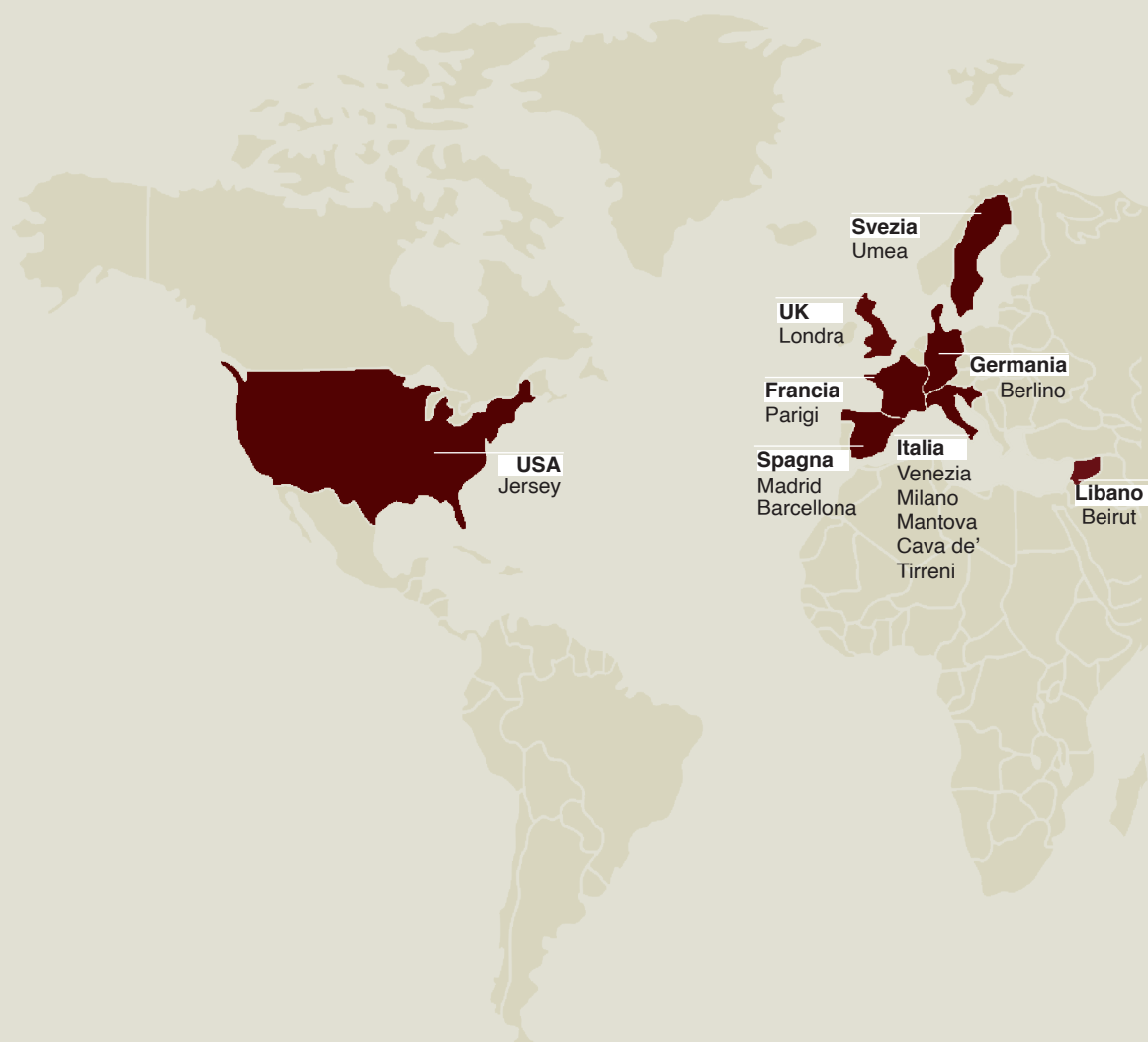


Fig. 32 Elaborazione personale delle aree di diffusione di Wasp Hub

Wasp Hub sono unità di lavoro localizzate in diverse parti del mondo, sono pensate e realizzate per permettere la condivisione di qualsiasi innovazione con la rete Hub. Wasp hub sono ambienti di lavoro dotati di macchine utili per produrre beni pensati per soddisfare i diversi ambiti di ricerca: casa, arte, cibo, salute e fabbricazione digitale . Wasp Hub sono unità di lavoro localizzate in diverse parti del mondo, sono pensate e realizzate per permettere la condivisione di qualsiasi innovazione con la rete Hub. Wasp hub sono ambienti di lavoro dotati di macchine utili per produrre beni pensati per soddisfare i diversi ambiti di ricerca: casa, arte, cibo, salute e fabbricazione digitale⁵⁹.

59 Wasp hub, in "WASP", <https://www.3dwasp.com/en/wasp-hub/#hub>

DESCRIZIONE: l'azienda

Il pensiero guida di WASP (World's Advanced Saving Project) si ispira al comportamento delle vespe vasaie. Come spiega Massimo Moretti, fondatore dell'azienda: "Come la vespa crea una casa utilizzando il materiale che trova sul posto, così noi depositiamo materiale poco alla volta con le nostre stampanti 3D e, pensiero dopo pensiero, cerchiamo di costruire case e oggetti per cambiare il mondo che ci circonda"⁶⁰.

Questo principio è alla base della filosofia aziendale, che punta a realizzare progetti a chilometro zero utilizzando risorse locali, riducendo costi, impatti ambientali e sprechi.

Il progetto WASP, non è solo tecnologia applicata ad un ideale, ma è un esperimento umanistico che naviga fra arte e scienza, economia e politica.

L'azienda progetta apparati e modelli di sviluppo sostenibile condividendone la propria visione attraverso una rete di 12 HUB in Italia e all'estero⁶¹.

L'attività principale di WASP si concentra sulla progettazione, produzione e vendita di stampanti 3D compatte e rapide pensate per consentire a chiunque di creare autonomamente ciò di cui ha bisogno. I processi di costruzione si fondano sui principi dell'economia circolare e mirano a garantire per sostenibilità e innovazione. Per raggiungere questi obiettivi, i macchinari sviluppati dall'azienda sono progettati per essere facilmente trasportabili, a basso consumo energetico e alimentati da energie rinnovabili come vento, sole e acqua.

I ricavi ottenuti dalla vendita delle stampanti 3D vengono reinvestiti nella ricerca e nello sviluppo di progetti integrati, finalizzati a una rivoluzione produttiva che favorisca un benessere diffuso⁶². Questa ricerca si concentra sia sull'impiego di materiali ecologici sia sulla creazione di modelli economici sostenibili. Nell'ottica di una democratizzazione delle conoscenze, Massimo Moretti promuove corsi di formazione, ricerca scientifica e open source, con l'obiettivo di diffondere la logica dell'autoproduzione.

Oltre al settore edilizio, WASP opera anche in ambiti come arte, artigianato, energia, alimentazione e salute, dimostrando un impegno trasversale per migliorare la qualità della vita e promuovere la sostenibilità.

APPROCCIO UTILIZZATO: gli obiettivi

Il fulcro dell'attività di WASP è la stampa 3D, una tecnologia che consente di creare oggetti utilizzando materiali reperibili localmente. L'obiettivo principale dell'azienda è quello di contribuire a un futuro sostenibile attraverso l'impiego di tecnologie avanzate, capaci di soddisfare i bisogni primari dell'uomo, come l'accesso a un'abitazione.

Un aspetto fondamentale del manifesto di WASP è la volontà di offrire a chiunque la pos-

⁶⁰ *Case stampate in 3D per salvare il mondo. Massimo Moretti racconta il progetto WASP*, in "BBS", 4 dicembre 2018. <https://www.bbs.unibo.it/case-stampate-in-3d-per-salvare-il-mondo-massimo-moretti-racconta-wasp/#gref>

⁶¹ Ibidem.

⁶² *Visioni*, in "WASP". <https://www.3dwasp.com/en/about-us/>

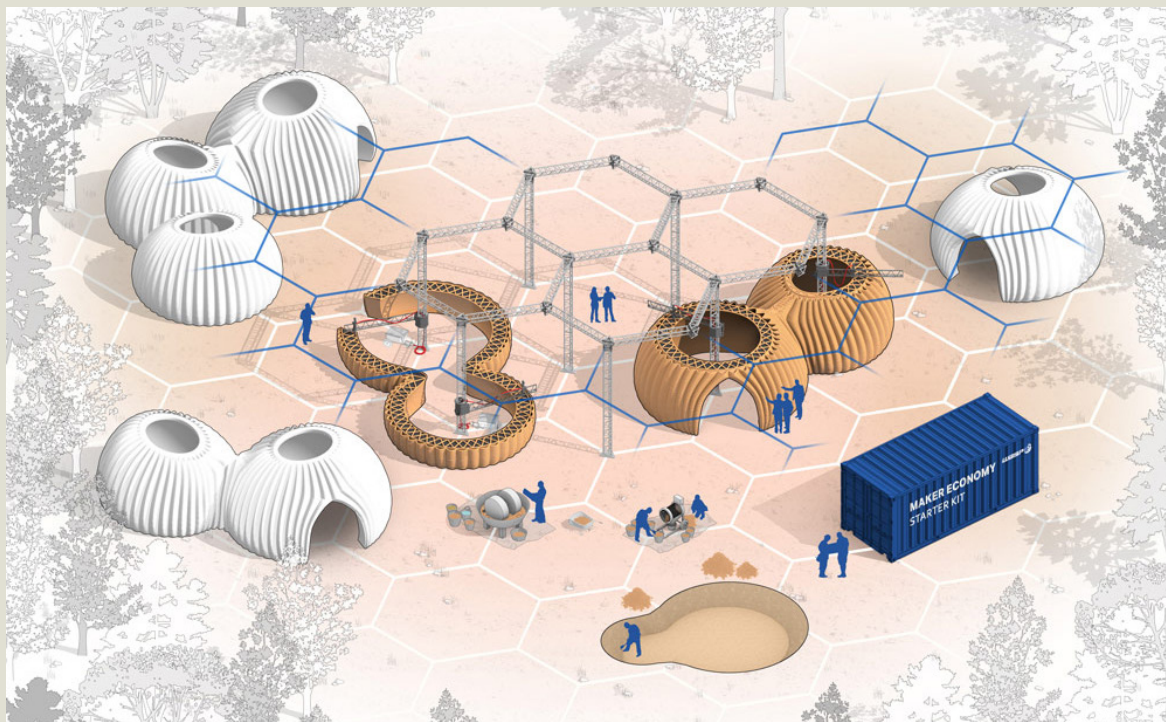


Fig. 33 Rappresentazione della ipotetica costruzione del villaggio TECLA. Fonte: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/>



Fig. 34 Stampa in corso di un modulo abitativo on site <https://www.rinnovabili.it/green-building/materiali-e-tecnologie/lundp-stampera-case-in-3d-in-colombia-grazie-alla-tecnologia-italiana-wasp/>

sibilità di realizzare autonomamente ciò di cui si ha bisogno (mini-produzioni), utilizzando un progetto scaricabile dalla rete o produrne uno proprio, da questo si sviluppa un concetto di produzione che “riduce i costi di trasporto e diminuisce drasticamente lo spreco di materiale, rallentando l’incremento dei rifiuti da smaltire”. del pianeta non sono sufficienti a sostenere l’attuale crescita demografica, diventa indispensabile adottare nuovi modelli di sviluppo. WASP si impegna inoltre a rendere le tecnologie più avanzate accessibili a tutti, promuovendo la conoscenza, offrendo pari opportunità, stimolando la creatività e supportando un’economia dal basso, con l’obiettivo di migliorare la qualità della vita e ridurre l’impatto ambientale⁶³.

SISTEMA DI PRODUZIONE

WASP ha iniziato la propria attività sviluppando la *PowerWASP*, una stampante 3D veloce, economica e versatile, capace di stampare materiali plastici e dotata di una funzione di fresatura per lavorare legno e alluminio. Grazie all’integrazione di una siringa, è possibile utilizzarla anche per stampare impasti ceramici. Successivamente, è stata introdotta la linea DeltaWASP, progettata per rispondere a esigenze di stampa di diverse dimensioni. L’integrazione dell’estrusore LDM WASP⁶⁴, specifico per materiali ceramici, ha reso questi modelli strumenti innovativi per l’artigianato digitale, con elevate prestazioni e un consumo energetico ridotto.

Le stampanti WASP adottano il sistema delta⁶⁵, caratterizzato dalla movimentazione esclusiva dell’estrusore. A differenza del sistema cartesiano tradizionale, che muove separatamente gli assi X, Y e Z, il sistema delta impiega tre bracci articolati collegati a una piattaforma mobile, che si muovono simultaneamente per posizionare l’estrusore. Questa configurazione riduce il consumo energetico e l’usura meccanica. Nel caso della Big Delta, alta 12 metri, il sistema delta ha permesso di raggiungere l’obiettivo posto, ovvero quello di realizzare una stampante di grandi dimensioni senza necessità di scale, ponteggi o sistemi di sollevamento, un risultato irraggiungibile con un sistema cartesiano.

Un’importante innovazione introdotta da WASP è il ***Resurrection System***⁶⁶, evoluzione della funzione “Stop e Salva”. Questo sistema consente di interrompere la stampa 3D e riprenderla esattamente dal punto in cui era stata fermata. Le coordinate di estrusione vengono salvate su una SD card, permettendo alla stampante di ripartire senza perdita di dati. Questa funzione risulta particolarmente utile in cantiere, dove le interruzioni di corrente possono compromettere il lavoro. Dal punto di vista tecnico, l’energia necessaria per il salvataggio è immagazzinata in un condensatore protetto da un diodo, impedendo ai motori della stampante di consumare la corrente residua. Il sistema è stato integrato in tutte le stampanti DeltaWASP, rappresentando una vera svolta nel settore della stampa 3D.

63 *Il manifesto*, in “WASP”. <https://www.3dwasp.com/chi-siamo/#manifesto>

64 LDM WASP è un estrusore professionale per stampare materiale fluido-densi, migliora le sue performance grazie ad una vite in acciaio progettata per triplicare il flusso di estrusione. Fonte: <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-ceramica-delta-wasp-2040-clay/>

65 *Big Delta WASP 12 mt*, in “WASP”. <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-gigante-bigdelta-wasp-12mt/>

66 *La ricerca sui materiali*, in “WASP”. <https://www.3dwasp.com/en/bigdelta-the-history/>



Nel 2016, WASP ha lanciato il **Maker Economy Starter Kit**⁶⁷, un sistema di progettazione e costruzione in scala architettonica racchiuso in un unico container. Questo kit contiene tutto il necessario per la realizzazione autonoma di un'abitazione e si basa sui principi della fabbricazione digitale. L'idea è quella di replicare e condividere le conoscenze in tutto il mondo grazie alle tecnologie digitali, offrendo soluzioni sostenibili e accessibili per la costruzione.

PROCESSO DI STAMPA

1. Progettazione digitale e preparazione del file⁶⁸

- Creazione del modello digitale parametrico (es. Grasshopper).
- Creazione del G-code.

È necessario accertarsi che il modello 3D presenti le seguenti caratteristiche: solido chiuso, posizionamento corretto ed esportazione in formato .stl tramite software di slicing.

Il software di slicing suddivide il modello 3D in tante sezioni, dando la possibilità all'utente di impostare temperatura e parametri di stampa, determinando la qualità del prodotto stampato e la velocità del processo. Il risultato dello slicing è un file testo contenente tutte le coordinate dei movimenti, e i comandi che la stampante andrà ad eseguire.

- Aprire il software di slicing (es. Cura);
- Caricare il file. stl e impostare i parametri di stampa;
- Salvare il gcode all'interno della sd card e inserirla nella stampante.

2. Preparazione dei materiali

- Miscelazione del materiale:

I componenti principali sono: cruda, argilla, sabbia, acqua e fibre naturali. Il materiale viene preparato utilizzando miscelatori meccanici automatizzati, che garantiscono un impasto omogeneo. Durante la miscelazione possono essere aggiunti stabilizzanti naturali per migliorare la durabilità e la resistenza del prodotto finale.

3. Configurazione della stampante/ Accensione stampante

- Installazione della stampante (es. Crane WASP o Big Delta) sul sito di costruzione.
- Regolazione degli ugelli in base al diametro richiesto (es. 18-30 mm).
- Collegamento del sistema di pompaggio e verifica del flusso di materiale.

Il materiale miscelato viene trasferito all'estrusore tramite pompe a pistone o a vite.

La velocità del pompaggio è modulata per adattarsi alle necessità della stampa, evitando blocchi o interruzioni.

4. Estrusione del materiale (Tecnologia LDM)

- Il materiale viene estruso strato per strato, seguendo il percorso definito dal file G-code. È importante verificare che l'estrusore sia pulito⁶⁹

⁶⁷ *Maker economy starter kit*, in "WASP". <https://www.3dwasp.com/en/maker-economy-starter-kit/>

⁶⁸ *Supporto WASP*, in "WASP". <https://www.3dwasp.com/supporto/>

⁶⁹ Il processo "**Clean Extruder**" è una procedura utilizzata per pulire qualsiasi materiale residuo all'interno dell'estrusore. Questa è una buona pratica prima di iniziare qualsiasi stampa, al fine di rimuovere i residui di materiale che potrebbero essersi parzialmente induriti o accumulati durante gli utilizzi precedenti.

L'estrusore è la parte della stampante 3D responsabile dell'estrusione del materiale. Nel tempo, i residui di materiale possono accumularsi all'interno dell'estrusore, soprattutto se il materiale si

- Le pareti possono essere progettate con cavità (infill⁷⁰) per l'inserimento di isolanti naturali come lana o paglia.

Integrazioni di elementi strutturali

- Durante la stampa, vengono integrati: Spazi per aperture (finestre, porte), cavità per isolanti o impianti tecnici, eventuali rinforzi strutturali (es. barre in legno o fibra).

5. Asciugatura e Rifinitura

- Dopo il completamento della stampa, la struttura viene lasciata asciugare naturalmente (di solito diverse settimane, a seconda del clima), per garantire una stabilità ottimale.
- Le superfici possono essere rifinite con intonaci a base di argilla o calce per proteggere la struttura da agenti atmosferici.

è fuso durante la stampa e si è raffreddato. Il processo "Clean Extruder" ha lo scopo di eliminare questi residui, garantendo un flusso di materiale pulito durante la stampa successiva senza causare intasamento durante la stampa.

La frequenza con cui pulisci l'estrusore dipenderà dal tipo di materiale utilizzato, dalle condizioni di stampa e da altri fattori. In generale, si consiglia di eseguire questa operazione ogni volta che si cambia il tipo di materiale o periodicamente per mantenere prestazioni ottimali. Fonte: Diego Villa, *Clean Excluder*, 29 febbraio 2024. <https://www.3dwasp.com/faq/clean-extruder/>

⁷⁰ L'**infill** è la struttura interna di un oggetto stampato. Durante il processo di stampa, l'infill è la parte riempitiva che si trova all'interno dell'oggetto, che non è visibile dall'esterno. Questa struttura interna è progettata per fornire supporto meccanico e stabilità all'oggetto senza doverlo stampare come un solido pieno, il che ridurrebbe significativamente i costi di materiale e il tempo di stampa. L'infill ha un andamento sinusoidale che varia a seconda di parametri di valutazione: isolamento, massa termica, ventilazione interstiziale e ombreggiamento. Fonte: MCA, Il primo prototipo di abitazione ecosostenibile stampato in 3D in terra cruda, in "TECLA – Technology and Clay", <https://www.mcarchitects.it/progetti/tecla-technology-and-clay>



Diagramma del processo di stampa 3D per la costruzione in terra cruda:

Progettazione architettonica:

definizione dei volumi e della geometria dell'edificio da costruire



Preparazione del modello 3D dell'edificio da costruire



Scrittura del G-code



Montaggio della stampante 3D sul cantiere:

nella versione base, sono necessarie tre persone per un'ora di lavoro



Alimentazione della stampante 3D:

nella versione base, bastano pochi metri di pannelli solari per alimentare la stampante 3D



Avvio della stampante 3D



Stampa 3D dell'edificio in terra cruda

Approvvigionamento del terreno:

scavo di tutto il terreno necessario direttamente dal cantiere



Selezione del terreno:

setacciatura del terreno tramite benna vagliatrice (granulometria 0-6 mm), per rimuovere pietre e altre impurità



Qualifica del terreno:

- Contenuto d'acqua (ASTM D216-10)
- Peso specifico dei solidi (ASTM D854-10)
- Densità (EN 13286-2:2005)
- Analisi granulometrica: distribuzione al setaccio (EN 17892-4:2005)
- Contenuto di sostanza organica (ASTM D2974-07a:2012)
- Classificazione del suolo HRB/UNI EN ISO 14688-1:2018



Stabilizzazione del terreno:

miscelazione del terreno con il biocomposito RH-calce nel mescolatore (muller)



Preparazione della miscela di terra:

miscelazione del terreno stabilizzato con gli altri componenti del mix-design e l'acqua di impasto, nel mescolatore



Trasferimento della miscela dal mescolatore alla pompa di alimentazione della stampante 3D



Stampanti del settore architettura:

1. BIG DELTA

Big Delta è stata realizzata nel 2015, la sua realizzazione ha visto un complesso percorso di ricerca.

L'ostacolo principale affrontato da WASP è stato legato all'estrusione dei materiali, ovvero comprendere come estrarre, ricaricare e mantenere attivo il sistema. Tra le diverse soluzioni esplorate, si è preso spunto dal comportamento della vespa vasaia, che deposita materiale e si procura nuove risorse una volta esaurite.

Un'importante evoluzione è stata rappresentata dall'introduzione dell'estrusore con ugello rotante, un elemento cruciale per il controllo dei movimenti nella stampa 3D. Successivamente, il sistema è stato ridisegnato adottando un concetto a coclea, consentendo un controllo più preciso dei flussi di materiale. L'attuale estrusore permette di interrompere l'erogazione e ritirare il materiale estruso, passando così da un'estrusione continua a una gestione micrometrica del processo⁷¹.

Il progetto Big Delta ha dimostrato l'efficacia del sistema: due operatori e una macchina sono riusciti a stampare un rifugio in tempi contenuti. Sono stati realizzati 270 centimetri di muro in argilla e paglia con un diametro di 5 metri, utilizzando circa 40 tonnellate di materiale. La struttura è composta da 135 strati, ciascuno con un peso medio di 300 kg e un tempo di realizzazione di circa 20 minuti.

DETTAGLI TECNICI:

Dimensioni fisiche: la stampante è alta 12 metri e larga 7m, con bracci modulari di 6m ed è montabile in circa un'ora da tre persone.

Informazioni di stampa: BigDelta 12m lavora a 220 volt ma può funzionare anche a 60 volt, perché i motori e l'elettronica sono stati realizzati per poter essere alimentati da pannelli solari.

Inoltre, muove l'estrusore con un carico da 0 a 200 kg, spostando quindi grosse quantità di materiale. Per ridurre le vibrazioni è preferibile mantenere il peso attorno ai 40-50 kg.

Materiali: L'estrusore sviluppato da WASP è progettato per lavorare con una varietà di materiali, in particolare miscele contenenti fibre lunghe⁷², come terra e paglia. Fin dall'inizio è stato concepito per estrarre materiali naturali, ma sono stati sperimentati anche composti inerti.

Le opzioni per i materiali da estrarre possono essere suddivise in due categorie principali: materie prime di origine naturale e materiali tecnici specifici. Per quanto riguarda il terreno grezzo, è possibile alleggerirlo aggiungendo vermiculite o altri materiali leggeri.

Gli impasti sintetici o tecnici, invece, possono includere materiali cementizi a base di calce mescolati con vetro soffiato o argilla espansa. Un risultato interessante è stato ottenuto aggiungendo polistirene al cemento, rendendo la miscela molto leggera e abbattendo i costi. Tuttavia, non è stato ancora completamente valutato l'impatto ambientale di questa soluzione.

L'utilizzo di materiali sintetici risulta più semplice rispetto alle miscele naturali, che richiedono ancora approfonditi studi e ottimizzazioni. Nonostante ciò, il focus di WASP rimane

71 *La ricerca sui materiali*, in "WASP". <https://www.3dwasp.com/en/bigdelta-the-history/>

72 Big delta 12 mt, in "WASP". <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-gigante-bigdelta-wasp-12mt/>



Fig 35. Fotografia di Big Delta 12 m ubicata in sede di Wasp a Massa Lombarda. Immagine scatta dall'autore

orientato verso soluzioni naturali. L'azienda sta attualmente testando combinazioni di argilla e paglia, con l'aggiunta di canapa o derivati della canapa, oltre a materiali leggeri soffiati per migliorare le prestazioni delle miscele.

Velocità di stampa: Finora la velocità massima di stampa raggiunta è stata di 400 mm/s⁷³. La rapidità di stampa dipende anche dalla quantità di materiale contenuto nell'estrusore. Più che la velocità, il tema cruciale di Big Delta 12m è l'accelerazione, che è inversamente proporzionale al peso dell'estrusore. Per aumentare l'accelerazione e migliorare le prestazioni della stampante, è fondamentale utilizzare pompe esterne. Queste soluzioni consentono di azzerare il carico della macchina, garantendo un rifornimento continuo di materiale all'estrusore, ottimizzando il processo di stampa.

Campi d'applicazione: La BigDeltaWASP 12m è progettata per stampare utilizzando materiali prelevati direttamente dal luogo di origine. Questa caratteristica apre nuove prospettive per applicazioni innovative, non solo nell'ambito della costruzione di abitazioni a chilometro zero, ma anche nel campo del restauro e del recupero di resti archeologici e rovine⁷⁴.

Costo: non specificato

⁷³ Big delta 12 mt, in "WASP". <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-gigante-bigdelta-wasp-12mt/>

⁷⁴ Ibidem.



Fig 36 Prova di costruzione in terra cruda con Big Delta 12 mt
<https://www.3dwasp.com/stampiamo-insieme-la-prima-casa-di-terra/>



Fig 37. Prova di costruzione in terra cruda con Big Delta 12 mt
<https://www.3dwasp.com/stampiamo-insieme-la-prima-casa-di-terra/>

2. CRANE WASP

Nel 2018 WASP ha abbandonato l'idea di una stampante 3D gigante a favore della Crane WASP⁷⁵, un sistema modulare di stampa 3D collaborativa, che reinterpreta le tradizionali gru da costruzione secondo i principi della fabbricazione digitale. La Crane WASP si basa su un'unità stampante principale che può essere configurata in diverse combinazioni, adattandosi all'area di stampa e alle dimensioni del manufatto architettonico da realizzare.

L'area di stampa del modulo singolo è di 8,2 metri di diametro per un'altezza di 3 metri. Questo modulo può operare autonomamente per stampare materiali fluidodens di varia natura, come cemento, bio-cemento e impasti naturali. Una delle caratteristiche distintive del sistema è la sua espandibilità: partendo da un modulo singolo, è possibile aggiungere traversi e bracci stampanti, creando un sistema di fabbricazione digitale potenzialmente infinito, capace di adattarsi a progetti di qualsiasi dimensione⁷⁶.

DETTAGLI TECNICI⁷⁷:

Dimensioni fisiche

Il sistema di stampa è composto da una stampante dalle dimensioni generose, pari a 550 x 580 x 420 cm, con un peso complessivo di circa 500 kg. A supporto dell'estrusione del materiale vi è un sistema di pompaggio autonomo che misura 120 x 200 x 240 cm e pesa circa 300 kg. L'intera struttura è progettata per garantire stabilità, resistenza e facilità di montaggio in contesti di stampa su larga scala.

Informazioni di stampa: La stampante utilizza la tecnologia LDM (Liquid Deposition Modeling), una tecnica di stampa 3D a estrusione continua particolarmente adatta a materiali naturali e impasti ad alta viscosità.

L'area di stampa può raggiungere un diametro massimo di 8,2 metri e un'altezza fino a 3,2 metri, con un diametro minimo operativo di 2 metri. Gli ugelli intercambiabili (25, 30 e 38 mm) permettono di adattare la stampa alle caratteristiche del materiale impiegato, mentre la risoluzione dei layer varia tra i 12 e i 20 mm.

La velocità massima di stampa raggiungibile è di 200 mm/s, ma come per ogni sistema di stampa di grandi dimensioni, più che la velocità, è fondamentale l'equilibrio tra portata, pressione e stabilità dell'estrusione.

Specifiche del sistema di pompaggio: Il sistema di pompaggio è progettato per gestire materiali densi e disomogenei, con una capacità di carico di 80 litri e una portata fino a 250 litri/ora. Il tubo in dotazione ha una lunghezza di 15 metri, permettendo una buona libertà di movimento anche su grandi aree di stampa.

La pressione massima raggiungibile è di 35 bar e la granulometria del materiale supportato arriva fino a 4 mm. Queste specifiche rendono il sistema adatto a impasti ricchi di inerti o

75 Ferretti, E.; Moretti, M.; Chiusoli, A.; Naldoni, L.; de Fabritiis, F.; Visonà, M. *Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing*. Materials 2022, 15, 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743>

76 Crane WASP, in "WASP". <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>

77 Ibidem.

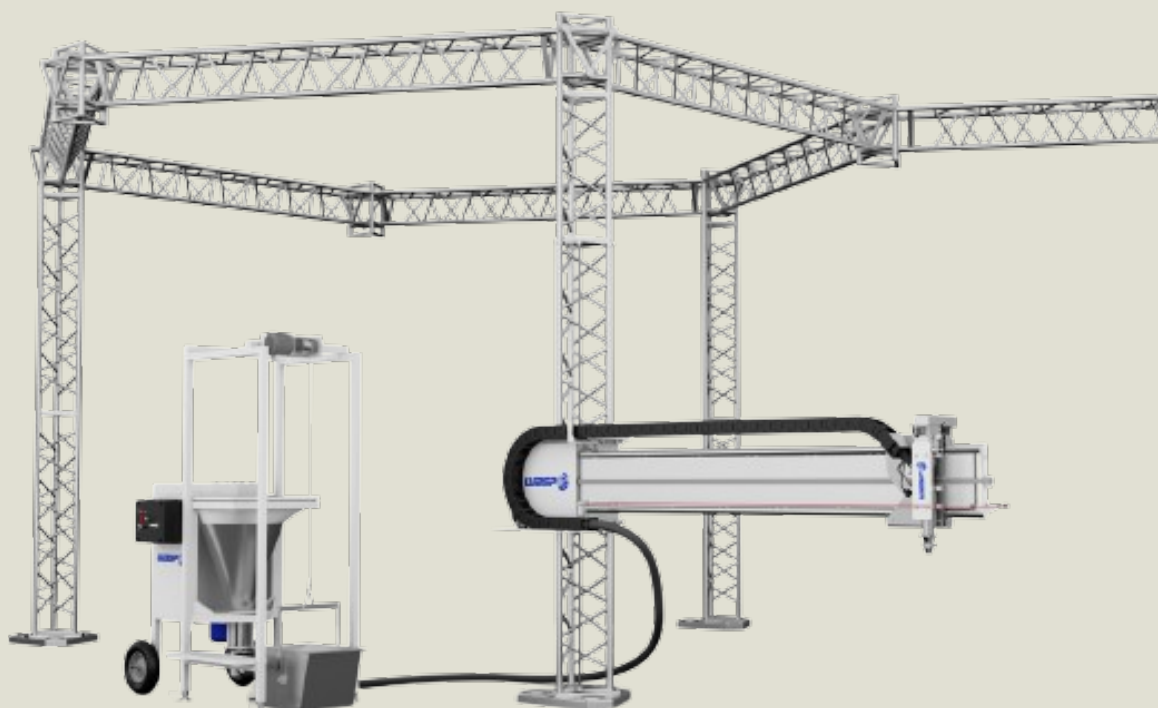


Fig 38 Stampante 3D Crane Wasp
<https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>



Fig 39. Crane Wasp in opera per la realizzazione del Dior concept store
<https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>

fibre, mantenendo comunque un flusso costante e continuo.

Materiali: Il sistema è compatibile con una vasta gamma di materiali, sia naturali che tecnici.

Tra i leganti utilizzabili ci sono argilla, calce aerea o idraulica e cemento, mentre gli aggregati devono avere una granulometria tra 0 e 4 mm. È fondamentale che la curva granulometrica degli inerti sia ben bilanciata per evitare problemi di segregazione durante il pompaggio. In genere, si consiglia un rapporto massimo di 2:1 (inerte:legante, in peso).

Le fibre, naturali o sintetiche, con lunghezze fino a 30 mm, vengono aggiunte per controllare il ritiro del materiale o per migliorarne le prestazioni meccaniche. WASP punta in particolare sull'utilizzo di materiali naturali, testando combinazioni di argilla e fibre vegetali come la canapa, con l'aggiunta di materiali leggeri (come vermiculite o argilla espansa) per ottimizzare peso, isolamento e sostenibilità.

Software e controllo: La stampante è dotata di un software di slicing proprietario, Exporter WASP GH, compatibile con i principali software open source come Cura, Slic3r e Simplify3D.

Supporta i formati più diffusi come .stl, .obj e .gcode, ed è compatibile con i sistemi operativi Windows, macOS e Linux.

Il controllo remoto avviene tramite OctoPrint, permettendo di monitorare e gestire il processo di stampa a distanza.

Meccanica e struttura: La struttura della stampante è realizzata in acciaio verniciato, con elementi in alluminio per combinare robustezza e leggerezza.

La tramoggia è costruita in acciaio inox, resistente alla corrosione e ideale per il contatto prolungato con materiali umidi o abrasivi.

Interfaccia e connettività: Il sistema offre connettività completa grazie a WiFi, LAN e porta USB.

La stampante Crane WASP e il sistema di pompaggio possono essere controllati in remoto tramite rete WiFi, permettendo all'operatore di gestire e ottimizzare tutte le fasi della stampa senza necessità di presenza fisica costante.

Alimentazione: Entrambi i componenti principali funzionano a 220/240 V – 50/60 Hz.

- La stampante consuma 1,5 kW.
- Il sistema di alimentazione continua (WASP Continuous Feeding System XXL) arriva a un consumo massimo di 2,5 kW.

Temperatura: Il sistema è progettato per funzionare in ambienti con temperatura compresa tra 10 °C e 30 °C. Per lo stoccaggio, è possibile conservarlo in ambienti tra 0 °C e 30 °C, purché asciutti e ben ventilati.

Costo: a partire da 160.000 €



possibili configurazioni di crane wasp⁷⁸:

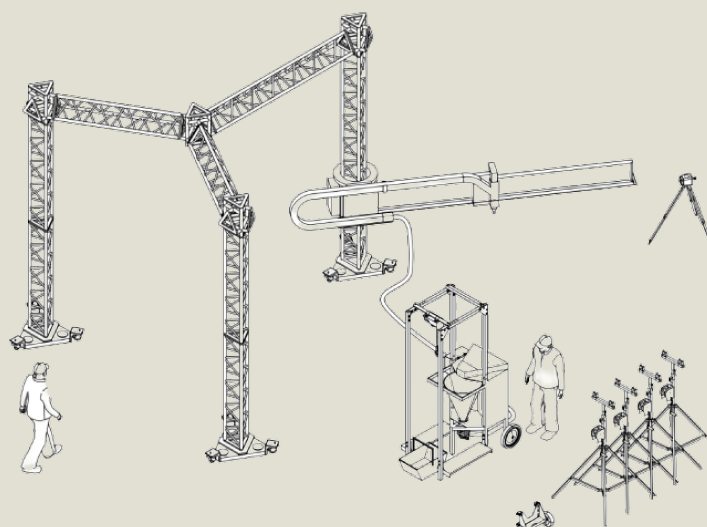


Fig. 40 Configurazione Crane Wasp 1
<https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>

Area di stampa 50 m²

Componenti contenuti nel kit:

- 1 unità WASP per gru
- Pezzi di alluminio a traliccio (configurazione a due vie)
- 1 Sistema di alimentazione continua e sistema di pulizia
- Installazione + Formazione + Consulenza remota
- 1 Contener
- tempi di spedizione 4 settimane

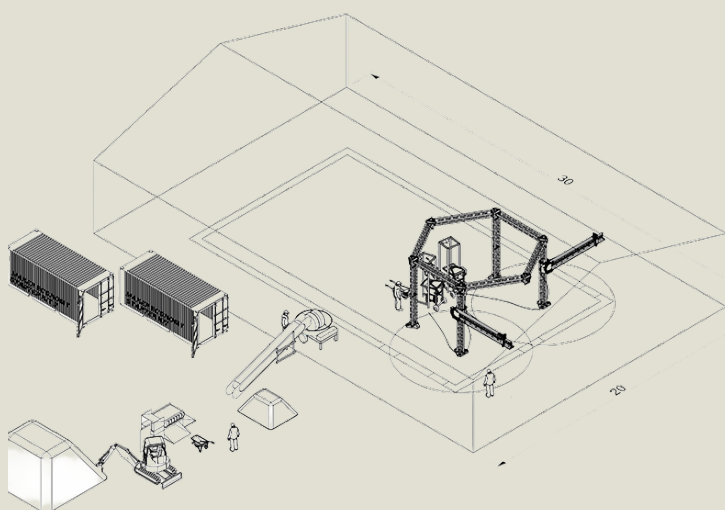


Fig. 41 Configurazione Crane Wasp 2
<https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>

Area di stampa > 100 m²

Componenti contenuti nel kit:

- 2 Unità WASP per gru
- Pezzi di alluminio a traliccio (configurazione esagonale)
- 2 Sistema di alimentazione continua e sistema di pulizia
- Installazione + Formazione + Consulenza remota
- 2 Container
- tempi di spedizione 4 settimane

L'attività di WASP evidenzia come la stampa 3D applicata alla terra cruda possa rappresentare una rivoluzione per l'edilizia sostenibile, unendo ricerca tecnologica, utilizzo di risorse locali e nuove possibilità progettuali, in un approccio capace di ridurre sprechi e impatti ambientali.

2.3 Confronto tra le principali innovazioni applicate alla terra cruda

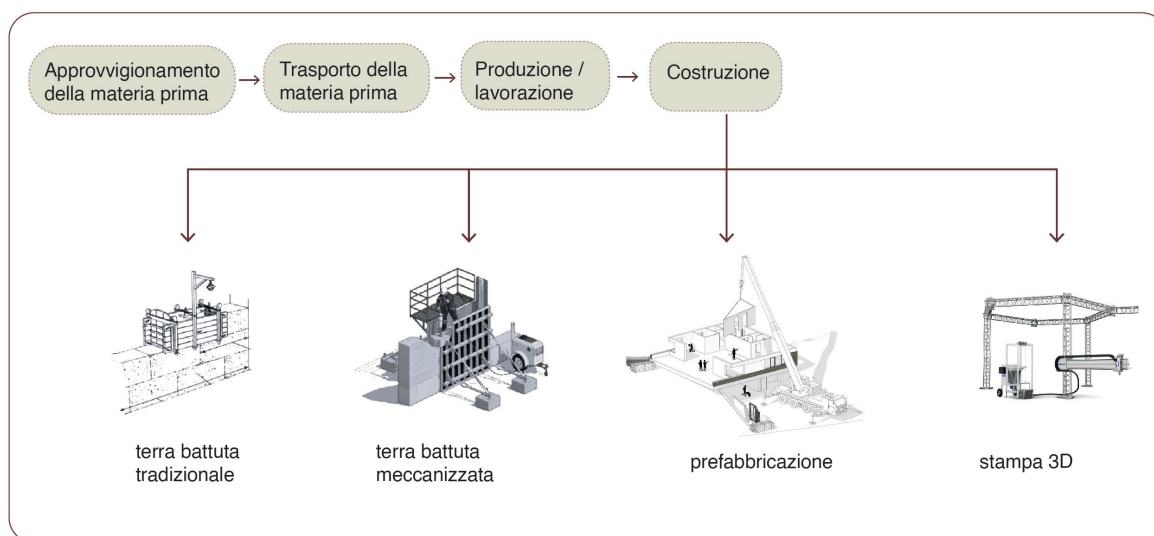


Fig. 42 I processi costruttivi in terra cruda. Fonte: Assunção, Julie Chadha, Kunaljit Vasey, Lauren Brumaud, Coralie Habert, Guillaume, *Can digital fabrication meet low-carbon materials? A closer look at the environmental impact of 3D printing with earth*, in "Proceedings of 19th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (IC-NOCMAT 2023)", Federal University of Paraíba, pag. 768 - 776. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000640421> (Rielaborazione personale)

L'applicazione di tecnologie innovative alla costruzione in terra cruda rappresenta un insieme di processi produttivi di grande potenzialità, ma che presentano ancora alcuni limiti rilevanti. La meccanizzazione segna un passo significativo rispetto alla lavorazione manuale tradizionale, consentendo di aumentare la produttività e ridurre il fabbisogno di manodopera. L'impiego di sistemi come i costipatori pneumatici, capaci di incrementare la densità e la resistenza delle pareti in terra battuta, o di impianti automatizzati di miscelazione, che garantiscono impasti più omogenei e con migliori proprietà meccaniche, permette di ottenere strutture più durevoli e di qualità superiore.

I sistemi di prefabbricazione offrono la possibilità di realizzare componenti in ambienti controllati, assicurando standard qualitativi elevati, maggiore precisione e una riduzione significativa degli sprechi di materiale. Tecniche avanzate di stabilizzazione consentono di produrre elementi più resistenti e durevoli, mentre la produzione in fabbrica riduce i tempi di costruzione in cantiere e consente di certificare la qualità dei manufatti. Permangono, tuttavia, alcune criticità: i costi e i limiti dimensionali imposti dai mezzi di trasporto, oltre alla necessità di disporre di spazi e macchinari adeguati alla produzione.

Uno dei principali punti di forza della stampa 3D è la libertà formale, ossia la possibilità di creare forme complesse e personalizzate, difficilmente ottenibili con metodi tradizionali. Questa libertà è però condizionata dalle dimensioni operative delle stampanti: una volta esaurito lo spazio di lavoro, diventa necessario spostare e ricalibrare i macchinari, con inevitabili rallentamenti e complessità logistiche. Inoltre, le stampanti di grande formato, in particolare quelle idonee alla lavorazione della terra cruda, richiedono ingenti investimenti e

ampi spazi di installazione, incidendo sulla fattibilità economica e organizzativa dei progetti.

Se da un lato i costi di manodopera e terra cruda possono risultare inferiori grazie a un maggiore livello di automazione, dall'altro occorre considerare l'elevato investimento iniziale necessario per l'acquisto, soprattutto nel caso della fabbricazione additiva. Le stampanti 3D adatte alla lavorazione della terra cruda possono raggiungere costi molto elevati, incidendo sulla sostenibilità economica dei progetti.

Esistono comunque dei chiari benefici: le nuove tecnologie consentono di ottimizzare l'uso della materia prima, riducendo gli sprechi e favorendo un'edilizia più sostenibile dal punto di vista ambientale. Allo stesso tempo, garantiscono un aumento dell'efficienza e della produttività: le macchine per la prefabbricazione e la stampa digitale riducono sensibilmente i tempi di costruzione e migliorano la qualità finale delle opere. L'automazione assicura inoltre maggiore precisione, standardizzazione e uniformità nella lavorazione, eliminando molti difetti tipici della realizzazione manuale.

In parallelo, la stampa 3D sta rivoluzionando il settore, aprendo la strada a forme architettoniche complesse, personalizzate e ottimizzate. Questa tecnologia rappresenta un'opportunità per realizzare edifici unici, riducendo al contempo i tempi di costruzione, i costi di manodopera e l'impatto del cantiere. Un ulteriore beneficio dell'impiego di processi automatizzati è l'aumento della sicurezza: riducendo l'uso di macchinari pesanti e il tempo di permanenza del personale in cantiere, diminuisce il rischio di incidenti sul lavoro. Rimane tuttavia centrale il rapporto tra uomo e tecnologia: a seconda del tipo di innovazione applicata alla costruzione in terra cruda, cambia la traiettoria del lavoro, che non viene annullato, ma piuttosto riconfigurato.

Considerando l'impatto del processo per ciascuna tecnica di produzione, è possibile dedurre che le tecniche di costruzione convenzionali hanno generalmente un impatto ambientale inferiore rispetto alla fabbricazione digitale, in parte a causa dei materiali stabilizzanti utilizzati⁷⁹. Tuttavia, come illustrato nel grafico, il miglioramento della risoluzione della stampa 3D con terra cruda prolunga inavvertitamente la durata delle operazioni robotiche, determinando un aumento del consumo energetico e, di conseguenza, un maggiore impatto ambientale.

79 Assunção, Julie Chadha, Kunaljit Vasey, Lauren Brumaud, Coralie Habert, Guillaume, *Can digital fabrication meet low-carbon materials? A closer look at the environmental impact of 3D printing with earth*, in "Proceedings of 19th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (IC-NOCMAT 2023)", Federal University of Paraíba, pag. 768 - 776. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000729747>

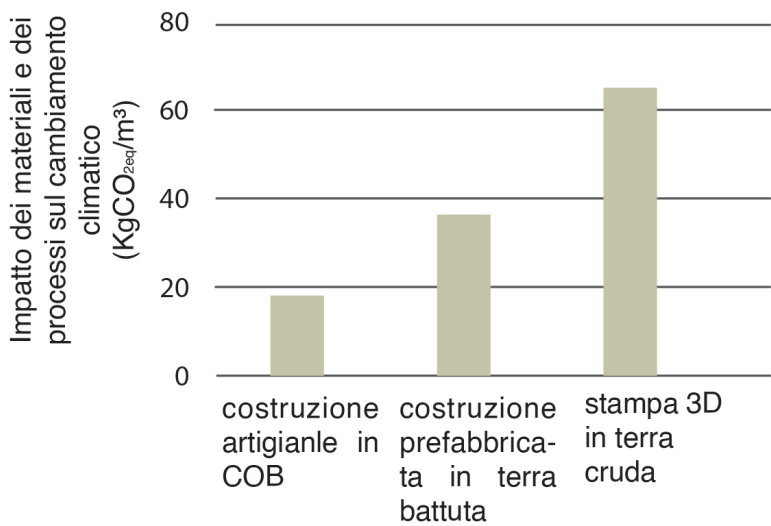


Fig. 43 Valutazione dell'impatto ambientale dei diversi processi costruttivi in terra cruda. Fonte Assunção, Julie Chadha, Kunaljit Vasey, Lauren Brumaud, Coralie Habert, Guillaume, Can digital fabrication meet low-carbon materials? A closer look at the environmental impact of 3D printing with earth, in "Proceedings of 19th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (IC-NOCMAT 2023)", Federal University of Paraíba, pag. 768 - 776. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000640421> (rielaborazione personale)

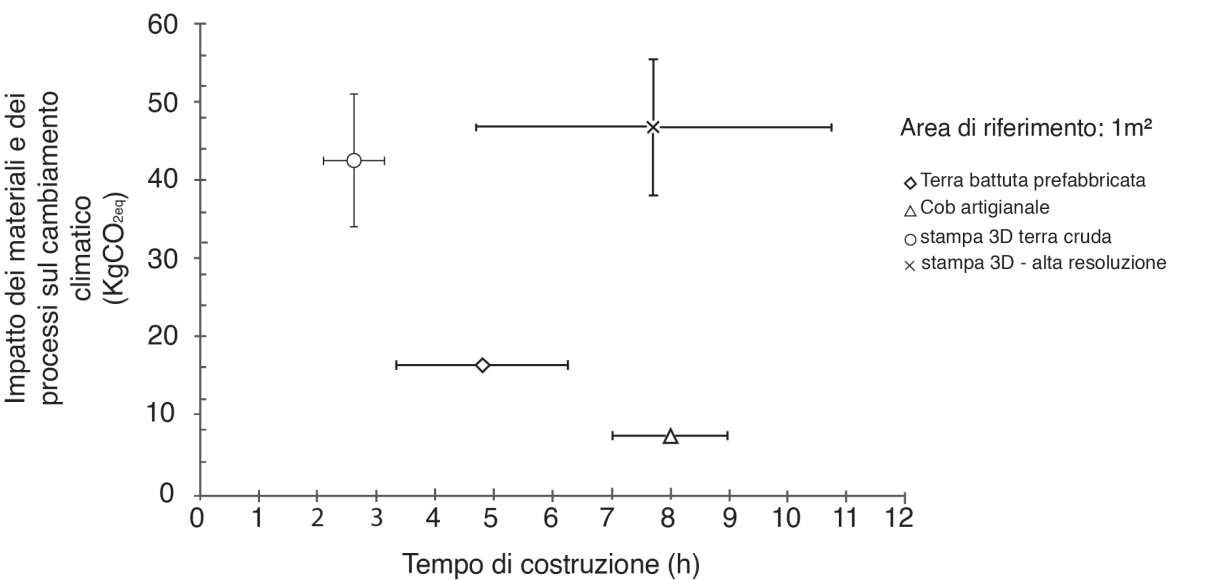


Fig. 44 Tempi di costruzione per diverse tecniche e relativo impatto ambientale per la realizzazione di 1 m² di superficie. Fonte: Assunção, Julie Chadha, Kunaljit Vasey, Lauren Brumaud, Coralie Habert, Guillaume, Can digital fabrication meet low-carbon materials? A closer look at the environmental impact of 3D printing with earth, in "Proceedings of 19th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (IC-NOCMAT 2023)", Federal University of Paraíba, pag. 768 - 776. <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000640421> (Rielaborazione personale)

In sintesi, la costruzione meccanizzata, la prefabbricazione e la stampa 3D applicate alla terra cruda offrono un connubio promettente tra efficienza, sostenibilità e libertà progettuale. Tuttavia, la diffusione su larga scala di queste tecnologie, in particolare della stampa 3D, è ancora limitata da vincoli normativi, elevati costi iniziali e complessità logistiche, che richiedono ulteriori sviluppi tecnologici e strategie mirate per essere superati.

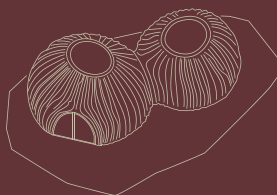
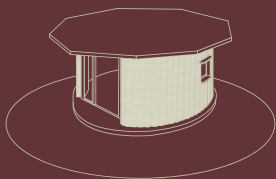
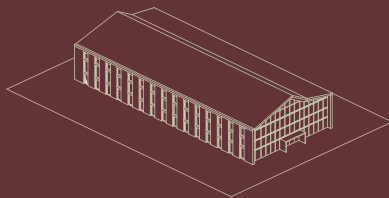
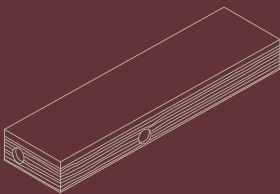
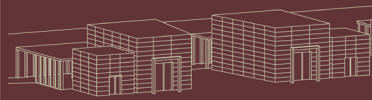
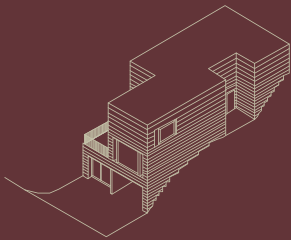
Il vero obiettivo è far sì che questi materiali, oggi spesso relegati a contesti sperimentali o marginali, possano diventare parte integrante delle pratiche costruttive future, contribuendo in modo significativo alla rigenerazione ambientale e culturale del nostro pianeta.

03

CASI STUDIO

**Il progetto di architettura in terra cruda:
Nuovi approcci e visioni**

03



3.0 Tecnologie e Innovazione nei Processi Costruttivi in Terra Cruda: Analisi di Casi Studio Europei

Il presente capitolo è dedicato all'analisi di sette casi studio, realizzati in terra cruda negli ultimi vent'anni, selezionati per la loro rilevanza nell'innovazione tecnologica e per la rappresentatività rispetto a differenti approcci progettuali e costruttivi.

La transizione da metodi manuali e artigianali a processi avanzati come la prefabbricazione e la stampa 3D non è determinata soltanto dalla necessità di rispondere alle sfide ambientali, ma anche da un cambiamento del ruolo della tecnologia nel settore.

Nel passaggio verso l'industrializzazione è necessario considerare i molteplici fattori che concorrono a definire il concetto di tecnologia. Secondo l'economista Milan Zeleny, qualsiasi tecnologia è formata da tre componenti chiaramente identificabili⁸⁰:

1. **Hardware:** è l'apparato materico di una determinata tecnologia (attrezzi, macchine), la struttura fisica, l'impianto o l'attrezzatura della macchina. Rappresenta il mezzo per svolgere i compiti richiesti di trasformazione al fine di raggiungere uno scopo o obiettivo. L'hardware, non si riferisce solo alla struttura fisica dei componenti, ma anche alla loro disposizione logica.
2. **Software.** è l'insieme di regole, linee guida e algoritmi necessari per l'utilizzo dell'hardware (programma, standard, regole di utilizzo) per svolgere le attività.
3. **Brainware.** rappresenta gli scopi, le applicazioni e le giustificazioni dell'uso dell'hardware e del software.

Queste tre componenti, che formano il nucleo tecnologico, sono interdipendenti e ugualmente importanti. Le relazioni che sussistono tra loro sono circolari (non lineari e non gerarchiche) e si rafforzano reciprocamente. Ciascuna delle tre componenti è inserita in una rete complessa di relazioni materiali, sociali ed informative che ne supporta l'applicazione: la rete di sostegno.

Questa è costituita dalle strutture fisiche, organizzative, amministrative e culturali che risultano necessarie al funzionamento del sistema, come: regole di lavoro, compiti, competenze richieste, contenuto del lavoro, standard e misurazioni, cultura e modelli di gestione.

Applicando tale modello al contesto dell'edilizia in terra cruda, l'hardware può essere identificato con l'impiego del materiale terra in differenti configurazioni fisiche, quali blocchi, pannelli o elementi modulari. Il software corrisponde all'insieme delle regole operative, dei protocolli costruttivi e delle metodologie applicative, comprendendo, ad esempio, le diverse tecniche di messa in opera o i sistemi di fabbricazione additiva. Il brainware si riferisce alla finalità ultima del processo, vale a dire la realizzazione di edifici in terra cruda, con le relative motivazioni di natura funzionale, estetica, sociale o ambientale.

80 Zeleny M., Human Systems Management. Integrating Knowledge, Management and Systems. Components and technology, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Singapore, 2005 pp.182-183. <https://books.google.tg/books?id=CHVqDQAAQBAJ>

La variazione di una sola di tali componenti è in grado di determinare scenari progettuali e produttivi significativamente differenti, incidendo su fattori quali l'entità del lavoro manuale richiesto, la durata complessiva del processo costruttivo, il livello qualitativo del manufatto, il grado di sostenibilità e l'incidenza economica dell'intervento. Tale dinamica evidenzia la natura sistemica e interdipendente delle tre componenti, nonché la necessità di considerare le implicazioni delle loro modificazioni in un'ottica integrata. In questo quadro, i casi studio analizzati mostrano come l'evoluzione coordinata di hardware, software e brainware, supportata da adeguate reti di sostegno, possa tradursi in miglioramenti concreti nelle prestazioni della terra cruda, superando alcune delle sue limitazioni tradizionali.

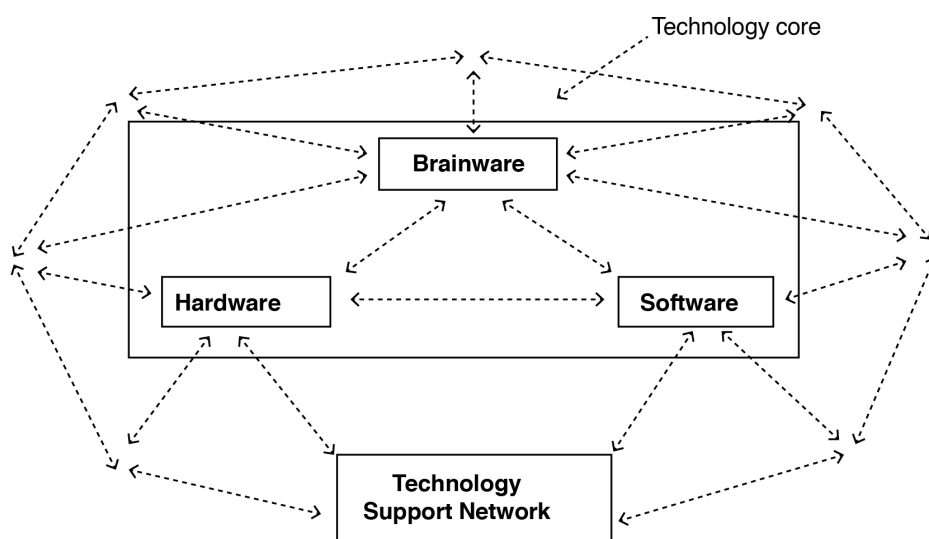


Fig . 45 Rielaborazione personale dello schema delle tre componenti che formano il nucleo tecnologico. Fonte: Zeleny M., Human Systems Management. Integrating Knowledge, Management and Systems. Components and technology. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Singapore, 2005, pp.183. <https://books.google.tg/books?id=CHVqDQAAQBAJ>

3.0.1 La Metodologia

I casi studio selezionati sono stati ordinati in base ai processi produttivi adottati, che sono:

- Costruzione meccanizzata on site: interventi realizzati direttamente in loco con macchinari per la compattazione e modellazione della terra;
- Sistemi di prefabbricazione: edifici realizzati con elementi in terra battuta prodotti in stabilimenti off site, facilitando l'assemblaggio e la standardizzazione.
- Stampa 3D: rappresenta la più recente evoluzione dei processi, con edifici costruiti grazie a tecnologie avanzate per la stampa della terra cruda in strati.

Sono stati selezionati casi studio rappresentativi di ciascun processo costruttivo, con l'obiettivo di evidenziarne le specificità operative, tecnologiche e progettuali.

L'analisi di ogni progetto si articola in cinque aspetti fondamentali:

1. Descrizione del progetto e del contesto: inquadramento generale del progetto, localizzazione geografica, quadro culturale, progettista.
2. Materia prima e la filiera di provenienza: caratteristiche della miscela utilizzata, approvvigionamento, eventuali stabilizzanti o additivi.
3. Processo edilizio e produttivo: tecniche costruttive impiegate, evoluzione rispetto ai metodi tradizionali.
4. Sistema costruttivo: struttura portante, fondazioni, partizioni, solai e coperture, strategie per la durabilità.
5. Soluzioni sostenibili e Efficienza energetica: valutazione del ciclo di vita del materiale, dell'impatto ambientale complessivo, delle prestazioni energetiche dell'edificio e dei sistemi impiantistici adottati per migliorare il comfort abitativo e ridurre l'impatto ambientale.

3.0.2 Criteri di selezione

La selezione di casi studio è stata effettuata attraverso l'analisi di fonti bibliografiche, articoli pubblicate su riviste di architettura e ricerche on line.

Questa tesi prende in esame progetti situati nel contesto europeo, al fine di garantire una coerenza normativa, climatica e culturale.

I criteri adottati per la selezione sono i seguenti:

- a. Innovazione tecnologica: i progetti sono stati realizzati negli ultimi venti anni, per consentire l'analisi delle più recenti innovazioni tecnologiche applicate nella costruzione in terra. Questo criterio è stato introdotto per esaminare come le tecnologie possano supportare lo sviluppo di nuovi processi di produzione anche con materiali tradizionali di origine naturale

anche in considerazione delle sfide sulla sostenibilità. La scelta di progetti recenti consente di valutare l'efficacia e l'evoluzione delle soluzioni tecniche, materiali e costruttive in un'epoca in cui l'innovazione sostenibile è sempre più al centro dell'architettura

- Rappresentatività dei processi produttivi: i progetti rappresentano uno dei tre principali approcci produttivi (costruzione in situ, prefabbricazione, stampa 3D).
- Varietà delle destinazioni d'uso: per mostrare la versatilità della terra cruda sono stati selezionati edifici con differenti destinazioni: edifici residenziali, edifici con funzioni pubblici, edifici industriali e edifici sperimentali.

Tra gli edifici residenziali, sono stati analizzati progetti come Casa Rauch e Casa de Tapia, che illustrano l'integrazione della terra cruda in contesti abitativi contemporanei. Per quanto riguarda gli edifici con funzioni pubblici, il Cimitero di Bushey e l'Alnature Campus offrono esempi di architettura istituzionale e basso impatto ambientale. L'Herb Centre Ricola rappresenta invece un caso di architettura industriale.

I casi studio



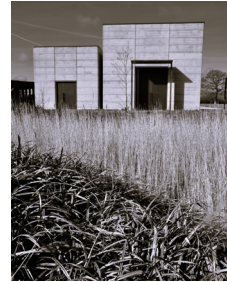
Costruzione on site



Casa Rauch,
AT, 2008



Casa de Tapia,
ES, 2022



Cimitero Bushey,
UK, 2017



Costruzione off site



**Ricola herb
centre, CH, 2013**



**Alnatura
Campus, DE,
2019**



Stampa 3D



Gaia, IT, 2018



Tecla, IT, 2021

LOCALIZZAZIONE DEI CASI STUDIO SELEZIONATI

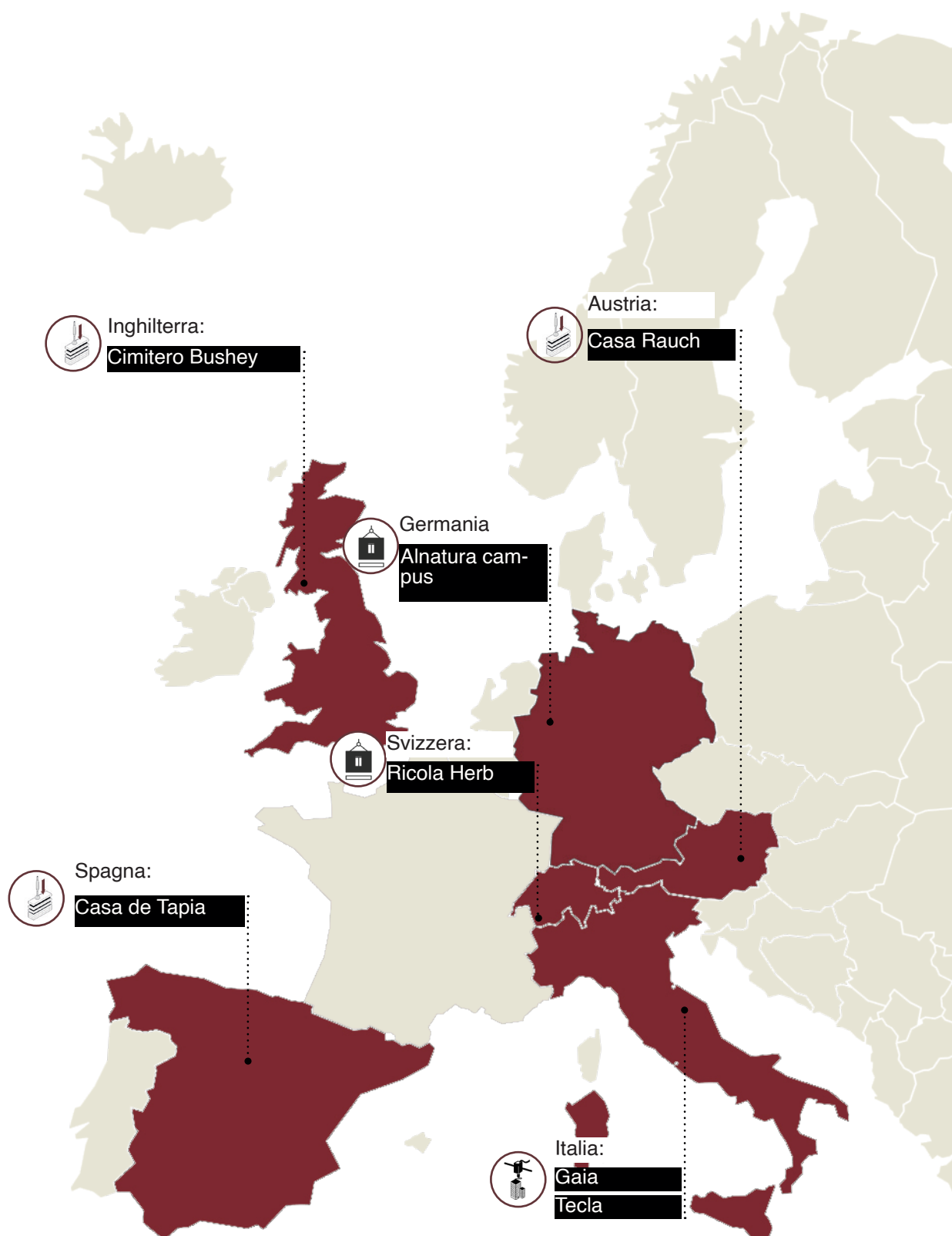


Fig. 46 Elaborato personale in cui vengono localizzate i casi studio analizzati

3.1

Processo di costruzione meccanizzata on site

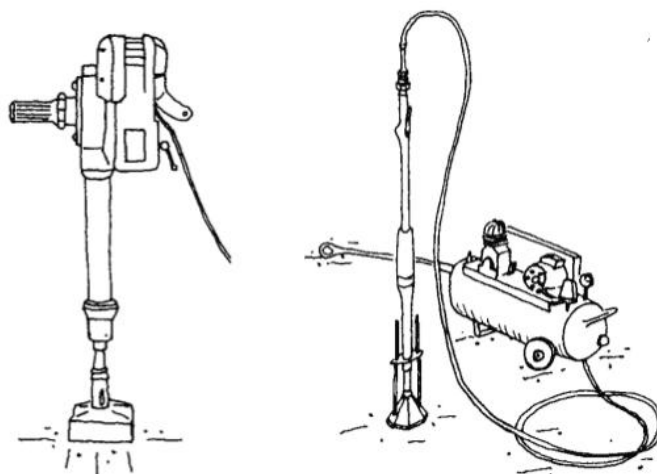


Fig. 47 Rappresentazione di un costipatore pneumatico per la compressione meccanica della terra e della cassaforma, all'interno della quale viene versata la miscela di terra. Rappresentazioni tratte da: Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Third and revised edition.* Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013.

CASA RAUCH, 2008 (AT)

Tipologia costruttiva:

Edificio residenziale monofamiliare

Superficie:

9 657 m² circa

Luogo:

Schlins, Austria (AT)

Anno di ultimazione:

2008

N piani:

3

Certificati:

-

Costo:

1,2 milioni di euro

Architetto:

Arch. Roger Bolthauser, Martin Rauch

Impresa Costruttrice:

Lehm Ton Erden





3.1 Processo di costruzione costruzione meccanizzata on site



Fig. 48 Facciata principale Casa Rauch. Fotografia di Beat Buler
<https://netzwerkehm.at/lehmbau/haus-rauch/>

IL PROGETTO/ descrizione:

House Rauch è l'abitazione dell'architetto Martin Rauch, progettata in collaborazione con l'architetto Roger Boltshauser. Si tratta di un progetto esemplare. L'edificio, situato sul pendio di una collina nel villaggio di Schlins (Vorarlberg, Austria), si sviluppa su tre piani e incarna il desiderio di realizzare una costruzione ecologica impiegando materiali naturali.

La casa si presenta come una struttura monolitica in terra cruda, realizzata con il materiale ricavato direttamente dagli scavi effettuati sul sito. È completamente riciclabile, poiché l'impasto utilizzato non contiene additivi chimici⁸¹.

L'edificio integra numerosi aspetti tecnici innovativi e si configura come un laboratorio sperimentale, in cui emerge chiaramente la volontà degli architetti di esplorare forme architettoniche contemporanee⁸².

Il progettista, Martin Rauch, nato nel 1958 a Schlins, nel Vorarlberg (Austria), e formatosi in ceramica, ha fondato nel 1999 lo studio di progettazione Lehm Ton Erde (argilla, argilla, terra), divenuto un punto di riferimento a livello europeo per le costruzioni in terra cruda.

Rauch ha scoperto l'architettura di terra durante un viaggio in Africa, dove l'incontro con tecniche costruttive primitive ha profondamente trasformato la sua visione artistica. Da lì è passato dallo stampaggio di piastrelle allo sviluppo di spazi abitabili, rifiutando di alterare il materiale: è la terra stessa, nella sua posa e lavorazione, a determinare l'aspetto finale dell'opera.

Con la sensibilità di un artigiano, Rauch ha aggiornato l'argilla come materiale da costruzione, perfezionando la miscelazione, le tecniche di compressione e la forma delle casseforme e nel 2010 è stato nominato membro onorario della Cattedra UNESCO in Architettura di Terra⁸³.

MATERIA PRIMA E FILIERA DI PROVENIENZA:

Il principale materiale impiegato per la costruzione dell'edificio è la terra cruda. Circa l'85% dei materiali necessari per la costruzione è stato ottenuto dallo scavo del sito⁸⁴, adottando così un approccio a "km 0".

Il materiale locale non è stato usato solo per le strutture principali, ma anche per elementi interni come la pavimentazione, aumentando così l'efficienza e la sostenibilità del progetto.

81 Chiara Salvini, *Rauch House – Agricultural School – Ricola Herb Centre*, Martin Rauch, in "Arketipo" 19 Gennaio 2023. <https://www.arketipomagazine.it/rauch-house-agricultural-school-ricola-herb-centre-martin-rauch/>

82 R Editors, *Rauch House in Austria by Roger Boltshauser with Martin Rauch*, in "The Architectural Review" 20 Febbraio 2020. <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/rauch-house-in-austria-by-roger-boltshauser-with-martin-rauch>

83 Martin Rauch, ceramista e ingegnere, in "AMC", 3 aprile 2016. <https://www.amc-archi.com/article/martin-rauch-ceramiste-et-ingenieur,4572>

84 Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p170.



Per completare l'edificio, sono stati utilizzati altri materiali, tra cui il rovere impiegato per i telai delle finestre, proveniente dal sud della Germania, e il legname destinato ai pavimenti, ricavato dai boschi circostanti. Questo approccio ha permesso di minimizzare l'impatto ambientale e di rispettare i principi della bioedilizia, che promuove l'uso di risorse locali e sostenibili, contribuendo così a ridurre l'impronta ecologica dell'edificio.

La miscela di terra utilizzata per la costruzione è composta da argilla, sabbia, limo e ghiaia. Non sono stati aggiunti additivi chimici⁸⁵, garantendo così la riciclabilità totale del materiale alla fine del ciclo di vita dell'edificio. Questa scelta non solo preserva la purezza del materiale, ma assicura anche che l'edificio sia biodegradabile, in linea con un approccio sostenibile e rispettoso dei principi dell'economia circolare.

85 Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p170.

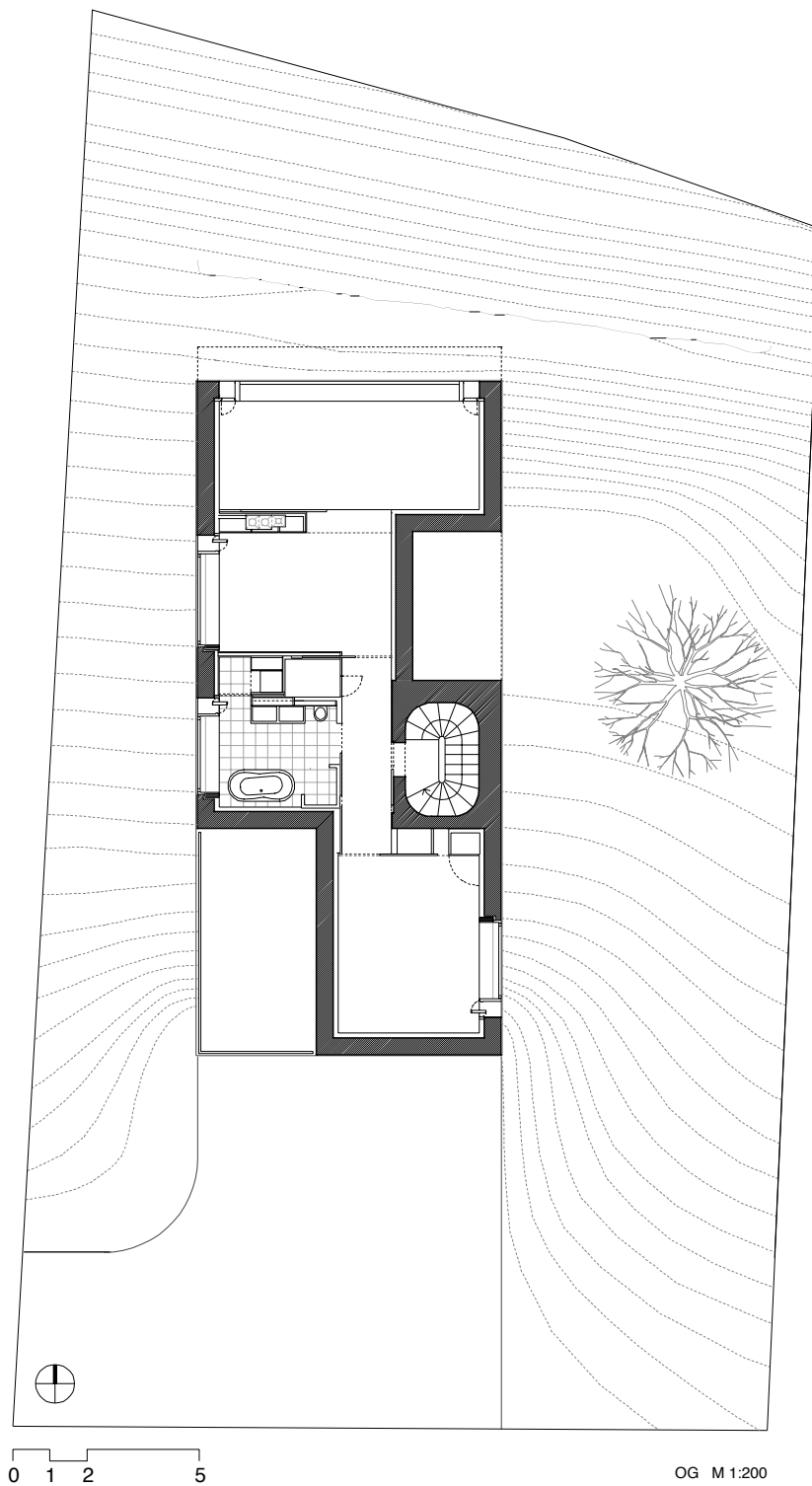


Fig 49 Pianta piano primo, scala 1:200.

Fonte: https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Kontrollierte_Erosion_im_Lehmbau-1176521.html

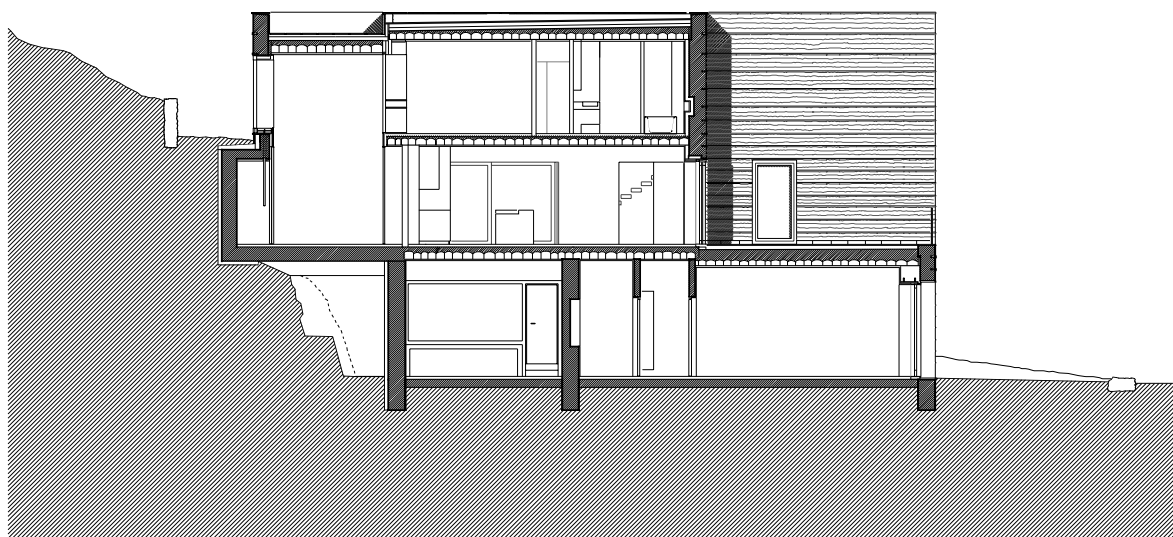


Fig 50. Sezione longitudinale, scala 1:200.

Fonte: https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Kontrollierte_Erosion_im_Lehmbau-1176521.html

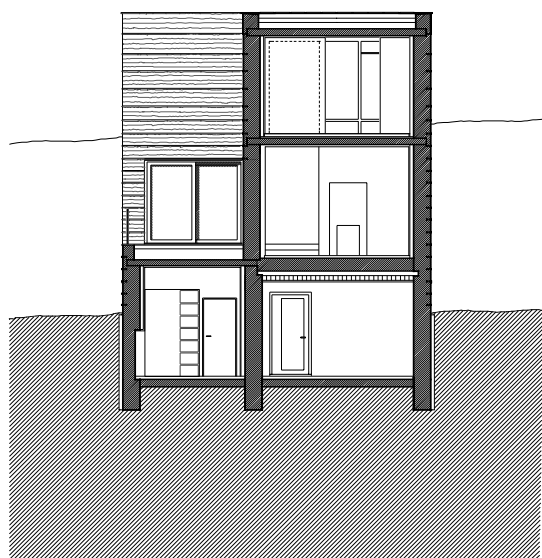


Fig 51. Sezione trasversale, scala 1:200.

Fonte: https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Kontrollierte_Erosion_im_Lehmbau-1176521.html

PROCESSO COSTRUTTIVO:

La tecnica utilizzata per la costruzione di Casa Rauch è quella della terra battuta (nota anche come pisè), realizzata in situ con l'ausilio di attrezzi meccanici per la compattazione della terra. Di seguito vengono descritte le principali fasi del processo:

1. La terra estratta durante gli scavi viene setacciata attraverso schermi con maglia da 70 mm⁸⁶. Il materiale separato viene successivamente frantumato con un frantoio per pietre fino a ottenere una granulometria di 30 mm⁸⁷. La selezione della giusta dimensione degli aggregati è fondamentale per garantire la stabilità strutturale dell'edificio.

- Successivamente, si prepara l'impasto di terra umida mescolando inerti, sabbia, limo, argilla e acqua in quantità variabili tra il 5% e il 12%. L'impasto viene versato nella cassaforma di legno.
- Il materiale setacciato viene quindi versato nella cassaforma, insieme all'impasto di terra ancora umido, in strati di 10-12 cm.

2. Ogni tre strati di impasto vengono compattati con un pistone pneumatico fino a raggiungere uno spessore di circa 8 cm, garantendo solidità e compattezza. Dopo ogni terzo strato, vengono posizionate lastre di mattoni sul bordo esterno della cassaforma e pressate.

3. La superficie appena compattata viene raschiata per renderla ruvida, in modo da favorire una migliore adesione con il successivo strato di terra.

4. Questo procedimento viene ripetuto fino a raggiungere l'altezza desiderata del muro, solitamente tra i 40 e i 60 cm.

5. Una volta completata la compattazione e raggiunta l'altezza prefissata, la cassaforma viene rimossa e si prosegue con l'elevazione successiva della muratura.

Il processo costruttivo di Casa Rauch evidenzia un approccio sostenibile e innovativo, in cui si combinano materiali locali, tecniche tradizionali e soluzioni strutturali moderne⁸⁸.

SISTEMI COSTRUTTIVI /

Sistema di fondazioni:

Il sistema di fondazioni della casa Rauch è costituito da fondazioni continue in calcestruzzo C15⁸⁹, realizzate con un basso rapporto di cemento e l'aggiunta di calce trass, preparata in loco. Le fondazioni hanno uno spessore di 45 cm, in linea con i muri in terra battuta, e un'altezza di circa 60 cm. Sono posizionate direttamente sul substrato roccioso, con la

86 Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p113.

87 Thomas Wieckhorst, *Erosione controllata nelle costruzioni in argilla*, in "Bauhandwerk", maggio 2011. Erosione controllata nelle costruzioni in argilla -Costruzione

88 Aurelio Greco, *Il rammed earth o pisè*, in "Un paesaggio per Biotopia", 1 luglio 2020. Il rammed earth o pisè I Un passaggio per Biotopia

89 Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchi-*



Immagini di cantiere

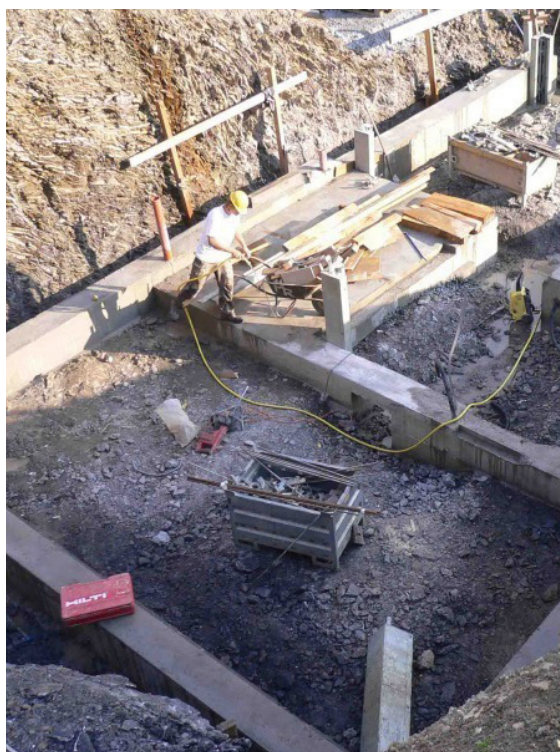


Fig. 52. Fondazioni in CLS (C15)



Fig. 53. Compressione della terra battuta



Fig. 54. Cassaforma in legno e acciaio



Fig. 55. Immagine dell'avanzamento del cantiere

Immagini di cantiere. Fonte: https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Kontrollierte_Erosion_im_Lehmbau-1176521.html

scelta consapevole di omettere l'uso di armature in acciaio.

Muri perimetrali esterni:

I muri perimetrali sono portanti realizzati in terra battuta con uno spessore di 45 cm. Questo spessore ha dimostrato la sua efficacia in termini di resistenza strutturale, prestazionale e semplicità costruttiva.

Essendo privi di stabilizzanti, la robustezza dei muri è ottenuta esclusivamente attraverso la compattazione e l'incastro del materiale lapideo presente nel materiale di scavo. La stratigrafia complessiva, partendo dall'esterno verso l'interno è così composta:

- **Strato esterno in terra battuta** (sp. 45cm), che costituisce il principale strato portante dell'edificio;
- **Lastre di mattoni cotti.** Questi sono incorporati nella terra battuta e sporgono dalla superficie della facciata e sono realizzati in loco utilizzando materiali estratti dal sito e successivamente cotti. Oltre a controllare il dilavamento della facciata, enfatizzano l'orizzontalità del volume, aumentando gli effetti di luce e ombra⁹⁰. La facciata di Casa Rauch è costantemente esposta alla pioggia battente a causa della sporgenza minima della copertura. I mattoni sporgenti, in caso di piogge battenti intense, rallentano il flusso d'acqua sulla facciata, riducendo di conseguenza l'erosione. Inizialmente, il contenuto di limo fine viene lavato via in grandi quantità, ma poiché i granuli di roccia presenti nella terra battuta contribuiscono a stabilizzare la sua superficie, l'erosione successiva avviene più lentamente⁹¹.

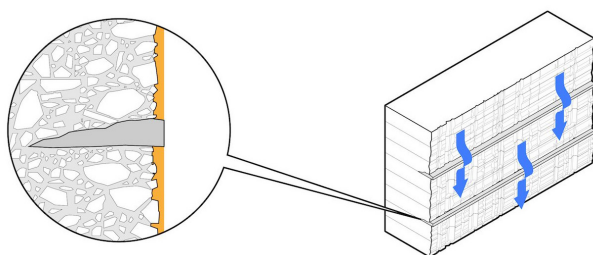


Fig. 56 Rappresentazione grafica del sistema di controllo del dilavamento. Kapfinger, Otto et al. Martin Rauch, *Refined Earth: Construction & Design with Rammed Earth*. Munich: Detail, 2015

- **Strato di isolamento termico e sistema di riscaldamento integrato.** Nei muri perimetrali portanti non è stato applicato un isolamento centrale, poiché avrebbe richiesto casseforme più complesse. Tuttavia, per proteggere i muri in terra battuta dall'umidità e ottimizzare l'isolamento termico, è stato aggiunto esternamente, su tutte le pareti a contatto con il terreno, uno strato di impermeabilizzazione bituminosa e un rivestimento in vetro cellulare. Sopra il livello del suolo, le pareti sul lato interno sono isolate con due strati di pannelli di canna palustre, un materiale naturale con elevato contenuto di

tektur = a model of advanced clay architecture. Basel: Birkhäuser, 2011; p114

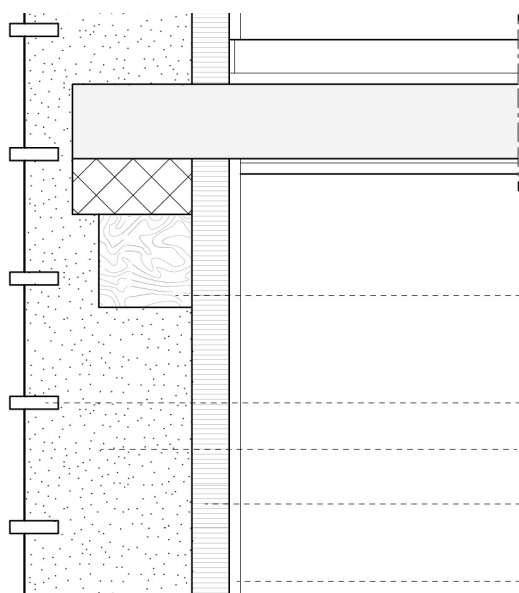
90 Chiara Salvini, *Rauch House – Agricultural School – Ricola Herb Centre*, Martin Rauch, in "Arketipo" 19 Gennaio 2023 Rauch House - Agricultural School - Ricola Herb Centre, Martin Rauch I Arketipo

91 Kapfinger O., *Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth*, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.p112



- silicati che consente l'uso senza conservanti. I pannelli in formato 200x100x5⁹² cm vengono applicati in due passaggi: il primo strato viene aderito direttamente al muro con un intonaco di argilla e viti per una maggiore stabilità; sopra il primo strato di pannellatura, viene applicato un secondo strato di pannelli di canna palustre con spessore 5 cm, aderito al pannello sottostante con malta di terra. Sulle superfici interne dei muri esterni, è installato il sistema di riscaldamento costituito da sottili tubi di plastica flessibili da 8 mm per il riscaldamento. La temperatura massima di alimentazione è di 28°C che produce una potenza termica di 120 W/mq⁹³. Questo sistema garantisce una distribuzione uniforme del calore nelle stanze, sfruttando al massimo l'inerzia termica dei materiali naturali della parete.
- L'ultimo strato, sul lato interno della parete è costituito da un **intonaco di terra** spesso 3 cm. Dopo un'adeguata essiccazione dello strato di malta di terra (realizzato sul cantiere con terra e sabbia locale) applicato al muro con una pompa per malta speciale e rinforzato su tutta la superficie con tessuto di lino, la superficie viene intonacata a più passaggi con uno strato di malta di argilla spessa 3 mm e poi levigata con acqua fino a ottenere una superficie liscia⁹⁴.

Sezione di dettaglio della parete esterna scala 1:50



Trave in calce trassata con
armatura

mattoni cotti per protezione
dall'erosione

Terra battuta 45 cm

Isolamento in canna palustre

Intonaco in terra con riscalda-
mento a parete

Fig. 57 Sezione di dettaglio rielaborato in scala 1:50.

Fonte: Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p165.

92 Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p113; p.117

93 Ibidem.

94 Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p113; p.117

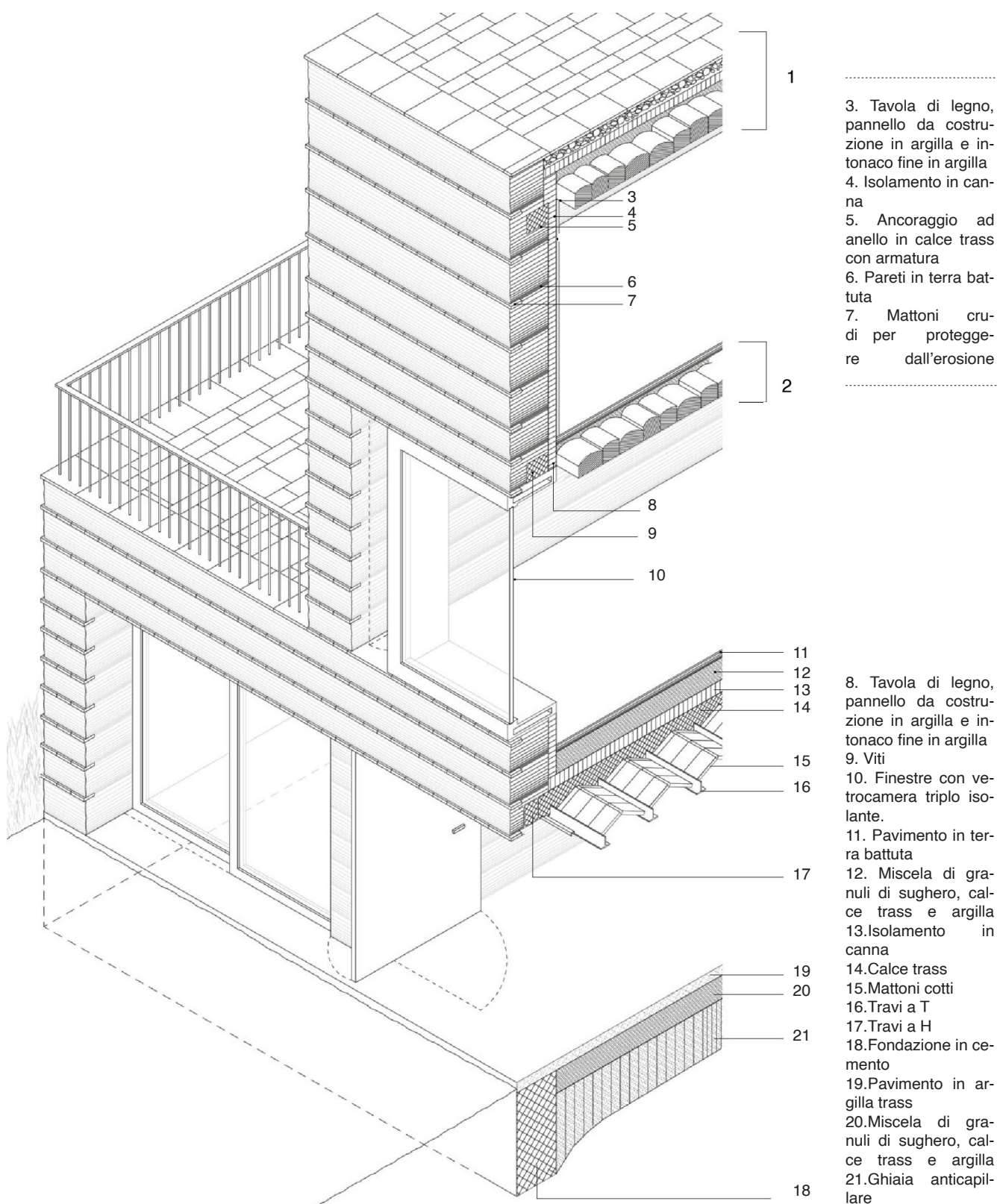


Fig 58 Spaccato assonometrico Casa Rauch.
 Fonte: <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>



1. Dettaglio del sistema di copertura

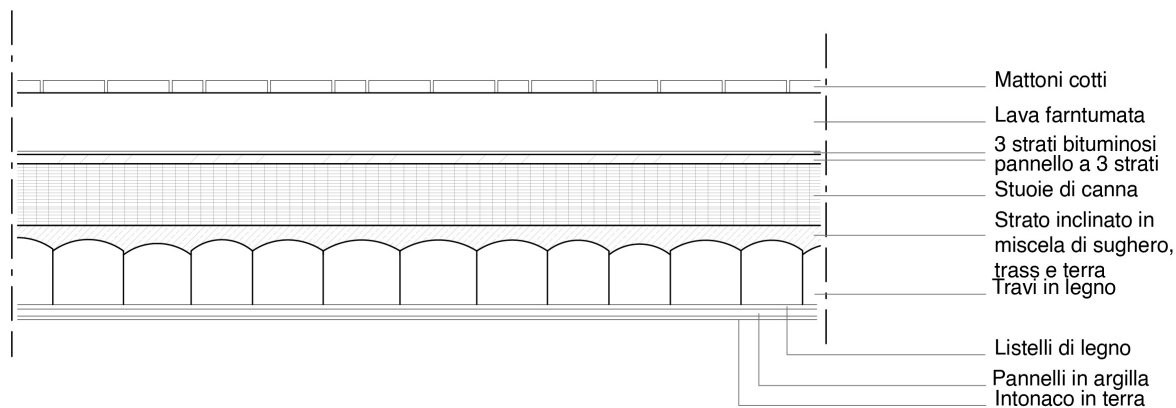


Fig. 59 Sezioni di dettaglio rielaborati e tratti da: Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p167- 168.

2. Dettaglio del solaio intermedio

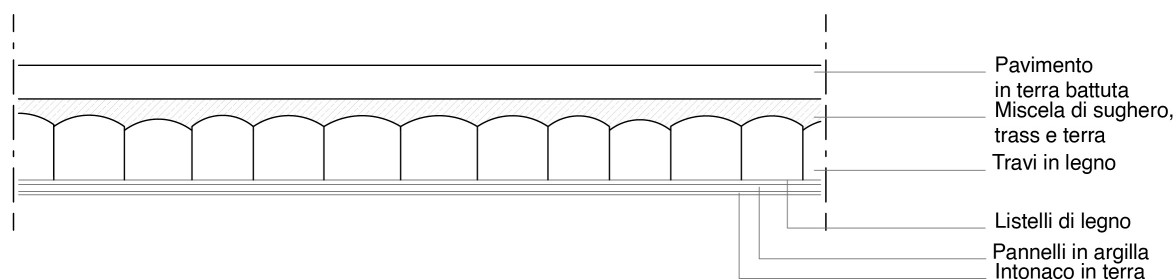


Fig. 60 Sezioni di dettaglio rielaborati e tratti da: Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p167- 168.

Sistema di Copertura:

La stratigrafia complessiva del sistema di copertura, partendo dall'interno verso l'esterno è così composta:

- **Intonaco di terra;**
- **Pannelli in argilla;**
- **Listelli in legno;**
- **Travi in legno**, ricavate dai tronchi con uno scarto minimo, tagliate in modo grezzo e lasciate essiccare all'aria. La combinazione di terra battuta e legno è fisicamente ideale: la terra estrae umidità dal legno, poiché la terra cruda, con un contenuto di umidità di equilibrio del 6-7%, è più asciutta.
- **Strato di sughero, trass (pozzolana), miscela di terra;**
- **Stuoie di canna da 20 cm;**
- **Pannelli a tre strati;**
- **Tre strati bituminosi da 0,4 cm;**
- **Lava frantumata;**
- **Mattoni di fango** con formato 40 x 50 cm e spessore 4 cm, utilizzati sia nella copertura che per la pavimentazione del terrazzo⁹⁵. I mattoni sono realizzati con fango senza calce mescolato con sabbia silicea e delicatamente stesa su tavole ricoperte di sabbia. Questi vengono poi tagliati alle dimensioni desiderate con un coltello e lasciati asciugare. Durante il lento processo di essiccazione, si restringono approssimativamente del 4%, e lo strato di sabbia sottostante impedisce la formazione di crepe incontrollate. Successivamente, i mattoni vengono cotti nel forno ceramico a 970°C diventando altamente microporosa, il che significa che possiede una elevata capacità di assorbimento dell'acqua. Di conseguenza, i pannelli sono in larga misura resistenti al gelo e, in condizioni calde, possono equilibrare le temperature.

Solai intermedi:

A partire dall'interno verso l'esterno i solai intermedi sono così composti:

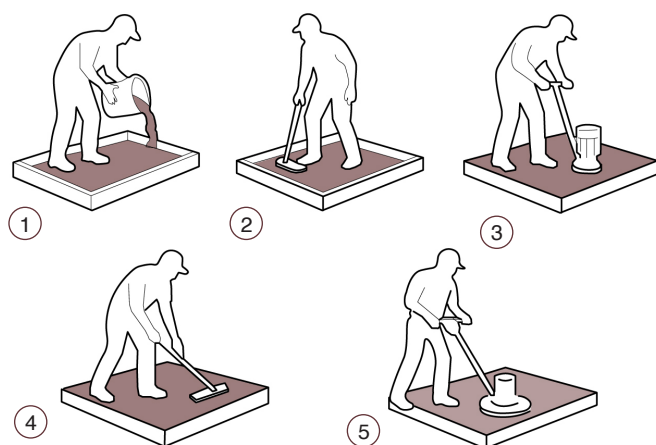
- **Intonaco di terra;**
- **Pannelli in argilla;**
- **Listelli in legno;**
- **Travi in legno,**
- **Strato di sughero, trass (pozzolana), miscela di terra;**
- **Pavimento in terra battuta**

Per la realizzazione del pavimento delle stanze, il materiale scavato e setacciato è stato versato nei casseri e distribuito fino a raggiungere uno spessore di 15 cm per poi essere compattato. La compattazione avviene inizialmente con scarpe livellatrici, poi con un pilone vibrante di 240 kg.

⁹⁵ Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p.118



Dopo la compattazione, la superficie viene rasata con una miscela di argilla levigata con sabbia di silice e lucidata con una levigatrice a disco singolo. I giunti, le aperture e le irregolarità superficiali vengono riempiti, ma i blocchi restano visibili e tangibili. Per le irregolarità maggiori, il pavimento è stato leggermente levigato utilizzando una rettificatrice per superfici in diamante. Durante l'essiccazione, il pavimento in terra cruda si restringe e si formano molte microfessure, che evitano tensioni mantenendo il pavimento elastico. Una volta essiccato la superficie è stata impregnata con caseina e cera, risultando facile da mantenere e adatto all'uso nell'area living⁹⁶.



1. Versatura del materiale nei casseri
2. Compattazione con scarpe livellatrici
3. Compattazione con pilone vibrante.
4. Rasatura della superficie con una miscela di argilla.
5. Lucidatura con levigatrice a disco singolo.

Fig. 61 Fasi di costruzione del pavimento in terra battuta. Elaborazione personale

In corrispondenza della copertura, è stato costruito, una trave ad anello rinforzato con acciaio e rivestita di terra battuta di 15 cm spessore, con lo scopo di trasferire uniformemente i carichi dei solai Dippelbaum e della copertura alle pareti in terra e fornire stabilizzazione orizzontale alle pareti a livello dei pavimenti⁹⁷.

Corpo scala:

La scala è stata realizzata piano per piano in tre fasi. I gradini, rinforzati con acciaio, sono stati gettati in cantiere utilizzando terra scavata, lavata e integrata con pietrisco verde e cemento trass. Dopo l'indurimento, sono stati levigati e lucidati. Ogni gradino contiene un blocco di vetro rotondo a filo superficie, che facilita il passaggio della luce verticale. La ringhiera, costruita come una scultura autonoma in acciaio spesso 1 cm, è stata inserita come un'unica unità⁹⁸.

Aperture:

Le finestre tipiche nelle costruzioni tradizionali in terra battuta hanno una forma stretta e verticale, ma nel caso di casa Rauch erano state progettate ampie aperture e i davanzali non dovevano essere visibili sulla facciata. Progettare e costruire queste aperture ha pre-

⁹⁶ Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011;p122.

⁹⁷ Chiara Salvini, Rauch House – Agricultural School – Ricola Herb Centre, Martin Rauch, in "Arketipo" 19 Gennaio 2023. Rauch House - Agricultural School - Ricola Herb Centre, Martin Rauch I Arketipo

⁹⁸ Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011.p121.



Fig. 62 Finestra del salone del primo piano con aperture laterali per il ricambio dell'aria - fotografia di Beat Buhler. Fonte: <https://www.lehmtonerde.at/en/products/product.php?aID=111>



Fig. 63 Immagine dell'ambiente interno della casa Rauch caratterizzata da ampie finestre. Fonte: <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>



Fig. 64 Immagine di cantiere in cui mostra i corpo di cassero predisposto nella parete in terra cruda per l'alloggiamento delle pedate
Fonte: https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Kontrollierte_Erosion_im_Lehmbau-1176521.html



Fig. 65 Immagine del corpo scala, Fotografia di: Albrecht Schnabel
Fonte: <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>

sentato una sfida che ha richiesto una nuova soluzione: l'architrave, gettato in loco con calce trass e rinforzato con acciaio, è rivestito all'esterno con uno strato di terra battuta spessa 15 cm⁹⁹.

Le finestre come anche tutte le porte sono unite meccanicamente ai muri di terra battuta in modo tradizionale, senza utilizzare colle e schiume¹⁰⁰. Le giunzioni tra i telai e i muri sono state ritoccate e sigillate con terriccio umido. Le giunzioni più ampie tra le finestre e i muri sono state riempite con fibra di lino e terriccio, immergendo la fibra nella miscela di terriccio. Questa miscela diventa dura dopo l'asciugatura. Grazie alla capacità del terriccio di estrarre l'umidità dal legno, i componenti in legno possono essere così collegati alla terza senza giunti visibili.

SOLUZIONI SOSTENIBILI e EFFICIENZA ENERGETICA

Ciclo di vita / Demolizione:

L'obiettivo dell'architetto Martin Rauch era costruire una casa che, alla fine del suo ciclo di vita, potesse semplicemente sgretolarsi senza contaminare il sito di costruzione con sostanze nocive. Come già accennato, la casa è stata costruita utilizzando l'85% di materiale scavato¹⁰¹. Una volta smantellata la casa, questo materiale potrebbe essere lasciato nella fossa di costruzione senza causare alcuna contaminazione ambientale: solo i componenti impiantistici (cavi, tubazioni, ecc.), le travi in acciaio e quelle ad anello rinforzate dovrebbero essere rimossi dal materiale in terra cruda. Questo materiale può essere riciclato, poiché non è stato trattato con additivi, consentendo un vero riciclo, piuttosto che un downcycling, che è pratica comune nel settore. Tutti gli elementi in legno dell'edificio hanno una finitura naturale, oppure sono oliati o trattati con primer a base di caseina, rendendoli materiali e prodotti che possono essere smaltiti o ulteriormente lavorati senza causare inquinamento ambientale.

Comfort termico:

La costruzione in terra della Rauch House offre un comfort termico superiore rispetto ai materiali convenzionali. Le temperature interne sono generalmente nella zona di comfort anche senza tende parasole; con un'ombreggiatura ottimale, si potrebbe mantenere la temperatura interna sotto i 28,5°C. Gli spazi nel seminterrato, riscaldati a 18°C in inverno, non superano mai i 26°C, neppure in estate, mentre nelle altre stanze la temperatura può superare i 26°C durante alcuni giorni estivi. Tuttavia, l'aggiunta di tende parasole potrebbe ridurre sensibilmente questi picchi. Un'osservazione interessante è che, a partire da una temperatura esterna di 10°C, la camera da letto registra temperature più elevate rispetto al soggiorno, pur avendo quest'ultimo una grande finestra a sud. Ciò è dovuto alle maggiori infiltrazioni d'aria naturale nel soggiorno, che favoriscono il ricambio d'aria. In inverno, tutte le stanze sono mantenute a 18°C, ad eccezione dello scalone che, essendo aperto ai livelli superiori, tende a riscaldarsi oltre tale temperatura. Le temperature al piano terra rimangono stabili intorno ai 21°C, e il profilo termico del piano superiore è molto simile a quello del piano terra¹⁰².

99 Boltshauser, Roger et al. Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture. Basel: Birkhäuser, 2011; p125

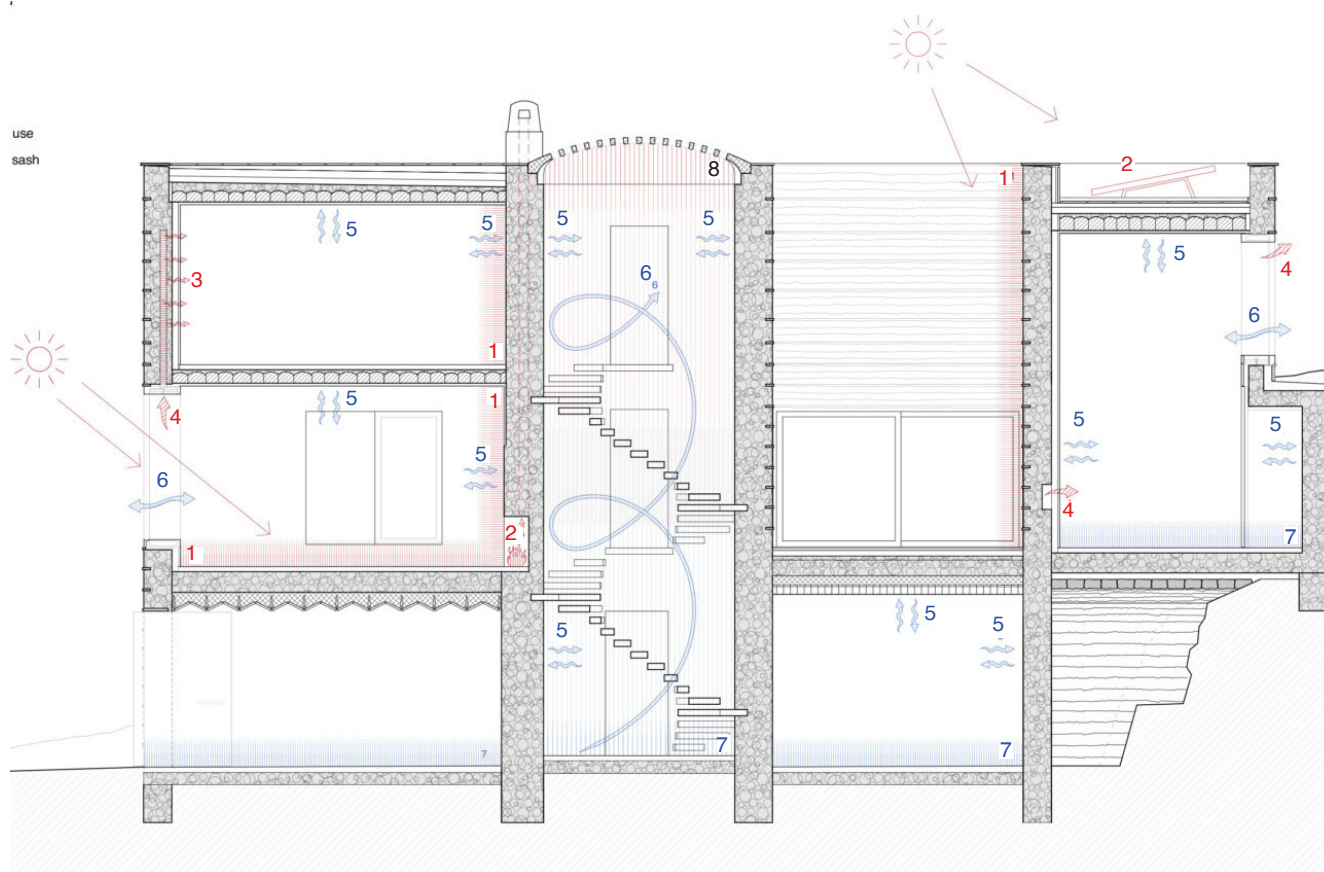
100 Ibidem., p126.

101 Boltshauser, Roger et al. Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture. Basel: Birkhäuser, 2011; p. 170

102 Ibidem., p. 152



Sezione longitudinale con andamento delle temperature interne



Massa di accumulo: pavimenti in terra battuta e pareti in terra battuta, utilizzo del calore residuo.

Generatori di calore 100% rinnovabili:

- collettori fotovoltaici
- stufa di accumulo con funzione di cottura
- riscaldamento

Riscaldamento a parete

Caso invernale: recupero del calore residuo dalle finestre a sud, utilizzo dell'aria per il riscaldamento dello studio.

Caso estivo: ventilazione tramite anta a ribalta nello studio

- 5 Comfort dell'aria interna, effetto igroscopico e antisettico della superficie in argilla
- 6 Ventilazione naturale tramite circolazione dell'aria
- 7 Ottimizzazione della temperatura degli ambienti tramite stanze in terra cruda.
- 8 Clima intermedio, vano scala non isolato

Riscaldamento e acqua calda:

Nella Rauch House, il 100% dell'energia per riscaldamento e acqua calda proviene da fonti rinnovabili¹⁰³. Un serbatoio di accumulo con caldaia integrata, situato al secondo piano, riceve energia da tre fonti: 14 m² di collettori solari sul tetto, un camino a legna con stufa integrata in cucina (alimentato con legna del bosco comunitario di Shlins), e una caldaia a pellet nel seminterrato, che interviene quando le altre fonti sono insufficienti. Il camino a legna è dotato di assorbitori autoregolanti che trasmettono circa il 50% dell'energia termica prodotta al serbatoio di accumulo utilizzando la gravità e possono essere disattivati se necessario. Inoltre, i pavimenti in terra battuta, oltre al riscaldamento murale, accumulano calore solare fino a 9 cm di profondità, rilasciandolo gradualmente e rendendo superfluo il riscaldamento diretto del pavimento¹⁰⁴.

Ventilazione e raffrescamento:

L'installazione di un sistema di ventilazione controllata o di raffreddamento è stata volutamente evitata, preferendo una ventilazione naturale. L'aria riscaldata dalla grande vetrata del soggiorno viene canalizzata attraverso un condotto nel soffitto fino allo studio a doppia altezza. In questo spazio, l'aria calda può riscaldare la zona superiore o, in estate, essere espulsa all'esterno tramite apposite aperture. La dispensa è dotata di un sistema di raffreddamento naturale: l'aria fresca dal seminterrato roccioso entra attraverso un condotto vicino al pavimento, e poi un'apertura di scarico nel soffitto la convoglia verso il camino, dove viene espulsa dal tetto¹⁰⁵.

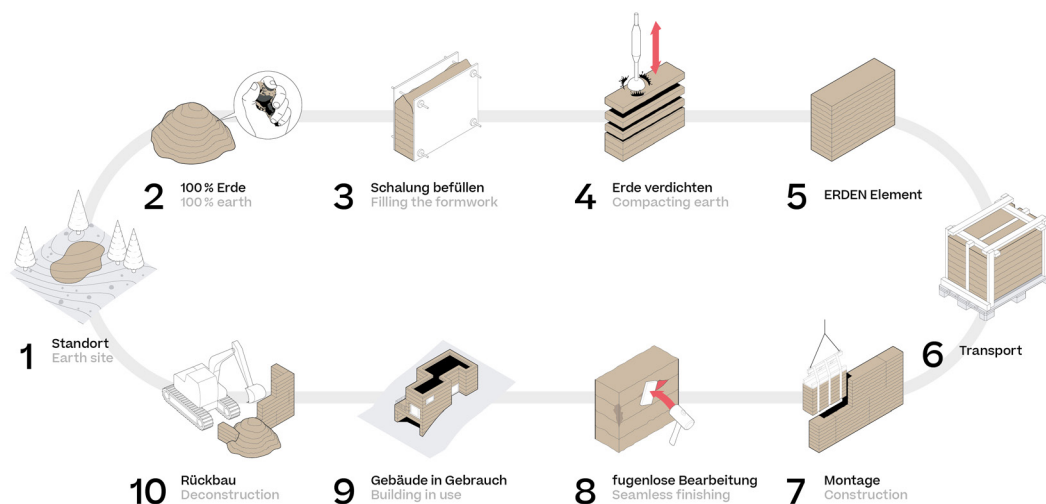


Fig. 67 Ciclo di vita Casa Rauch. Fonte: <https://www.erden.at/Why-earth>

103 Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Lehmarchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011; p. 159

104 Kapfinger O., *Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth*, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.p160

105 Ibidem., p.161



Schema del sistema di riscaldamento e acqua fredda / calda

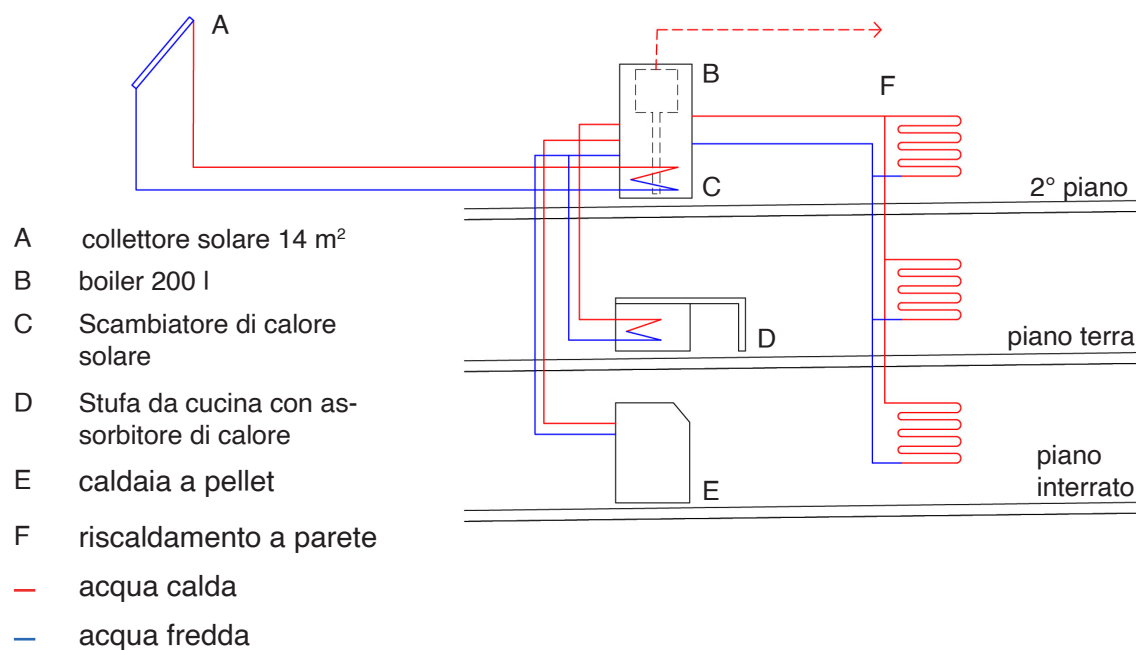


Fig. 68 Rielaborazione dello schema sistema di riscaldamento e acqua fredda / calda. Fonte: Kapfinger O., Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.p 161

Confronto dell'energia incorporata

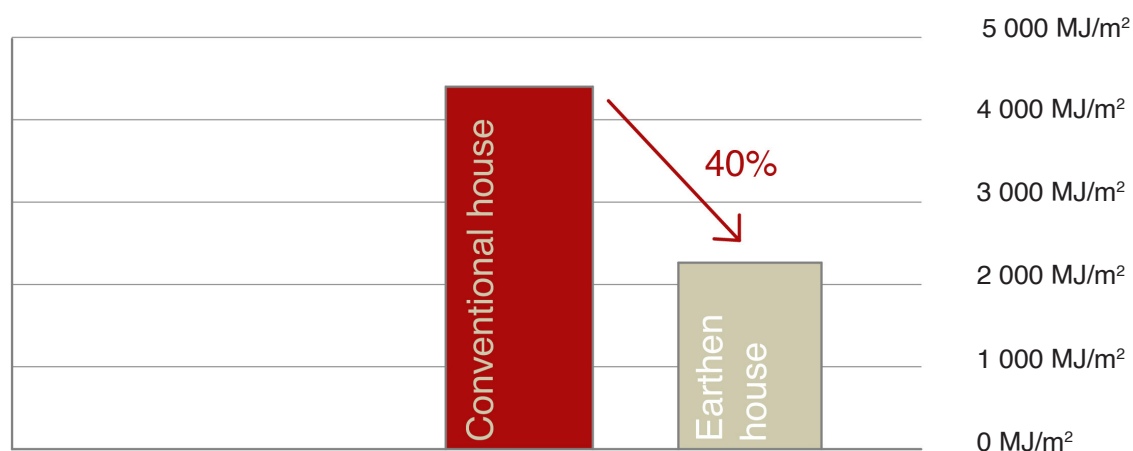
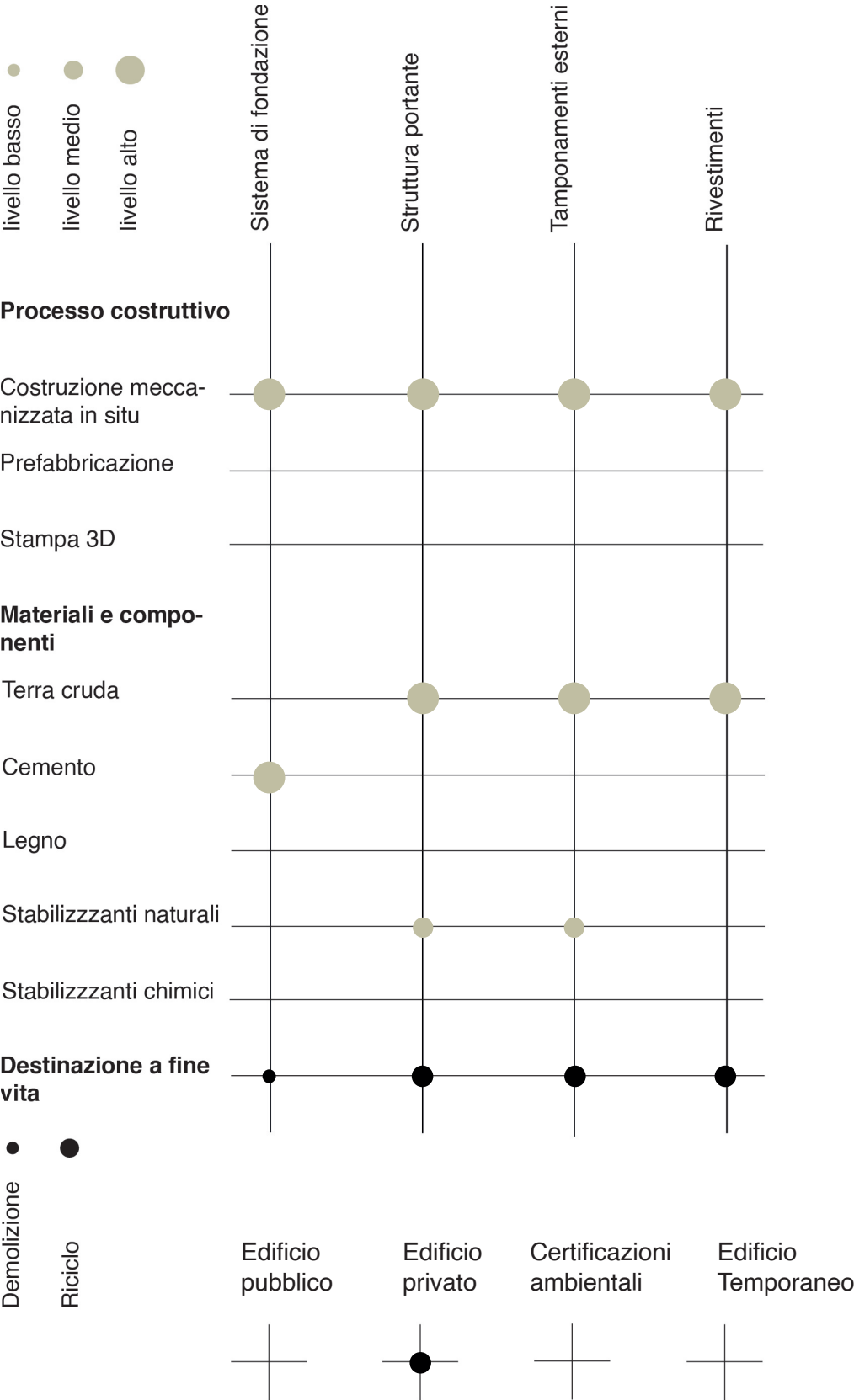


Fig. 69 Rielaborazione dello schema che confronta l'energia incorporata tra un edificio convenzionale e uno in terra cruda. Fonte: Kapfinger O., Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.p 163

Scheda riassuntiva



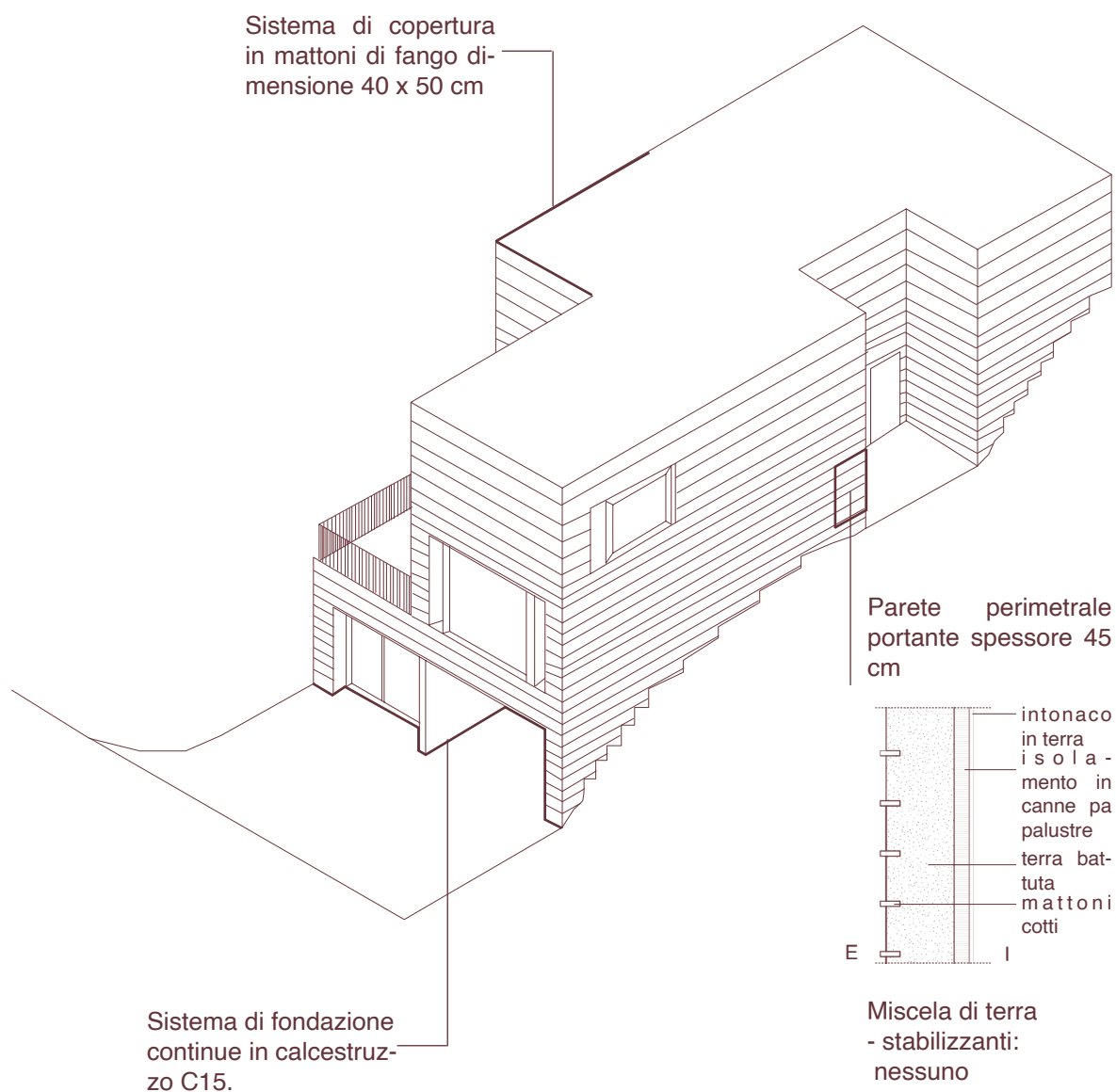


Fig. 70 Rappresentazione schematica di Casa Rauch con indicazioni delle principali caratteristiche costruttive adottate. Elaborazione personale.

Casa Rauch presenta un utilizzo marcato della costruzione meccanizzata in situ per tutte le componenti dell'involucro edilizio. La terra cruda costituisce il materiale principale impiegato, nella struttura portante, nei tamponamenti e rivestimenti, mentre l'uso di cemento e stabilizzanti naturali risulta limitato e puntuale. Tutti gli elementi sono progettati per essere riciclati a fine vita, sottolineando l'approccio circolare del progetto. L'edificio è identificato come residenza privata permanente, priva di certificazioni ambientali.

CASA DE TAPIA, 2014 (Spagna)

Tipologia costruttiva:

Edificio residenziale monofamiliare

Superficie:

276 m²

Luogo:

Ayerbe, Spagna

Anno di ultimazione:

2020

N piani:

3

Premi:

Terra Award 2016

Certificati:

-

Costo:

-

Architetto:

Edra Arquitectura km 0

Impresa Costruttrice:

Construcciones Salinero S.L





3.1 Processo di costruzione costruzione meccanizzata on site



Fig. 71 Facciata Casa de Tapia su lato strada. Fotografia di Xavier d'Arquer tratta da: <https://arquitectura.edraculturaynaturara.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

IL PROGETTO/ descrizione:

Casa De Tapia, ubicata ad Ayerbe a nord della Spagna, è vincitrice dell'International Architecture Award in Contemporary Land Terra Award 2016¹⁰⁶. Si tratta di un progetto di abitazione residenziale monofamiliare realizzato in terra che si eleva su tre piani.

La migrazione rurale subita in questa città nel corso del XX secolo ha portato alla scomparsa delle tecniche architettoniche tradizionali. Gli architetti con questo progetto cercano di suscitare l'interesse e la curiosità verso questa tipologia di edifici sostenibili, fortemente legati al territorio.

Difatti, Casa de Tapia fa riferimento alle antiche costruzioni locali in terra battuta in termini di orientamento, morfologia e uso di materiali locali. L'edificio è costruito all'interno del centro abitato, circondato da case costruite con tecniche di costruzione in terra (adobe, terra battuta, pietra mista) e riprende la forma rettangolare del lotto con il lato più lungo rivolto a nord.

Il progettista, Àngels Castellarnau, fondatore di Edra Arquitectura km 0, da oltre dieci anni si dedica allo studio dell'architettura tradizionale, aggiornandone le tecniche e perfezionando i metodi costruttivi specifici di ciascun contesto locale¹⁰⁷.

MATERIA PRIMA E FILIERA DI PROVENIENZA:

L'80% dell'edificio è realizzato in terra¹⁰⁸, è un materiale onnipresente e accessibile, fa parte dell'identità e dell'immaginario collettivo degli abitanti della zona, in modo complementare sono stati utilizzati il legno e la canna. Sono tutti materiali a km 0 che contengono un basso carico energetico e sono facilmente reperibili con un impatto ambientale quasi nullo, inoltre non contengono additivi né nella loro composizione né nella loro installazione. Oltre ai materiali elencati sono stati utilizzati anche calce idraulica, piastrelle, legno e lana di pecora da un raggio 150 km¹⁰⁹.

106 Angel Castellarnau Visus, *Casa vernacolare del 21° secolo*, "in materiaaward". <https://www.materiaaward.com/en/portfolio-item/21st-century-vernacular-house/>

107 Edra Arquitectura, *Casa de Tapia ad Ayerbe*, "in Edra Arquitectura Km 0", <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

108 Ibidem.

109 Ibidem.

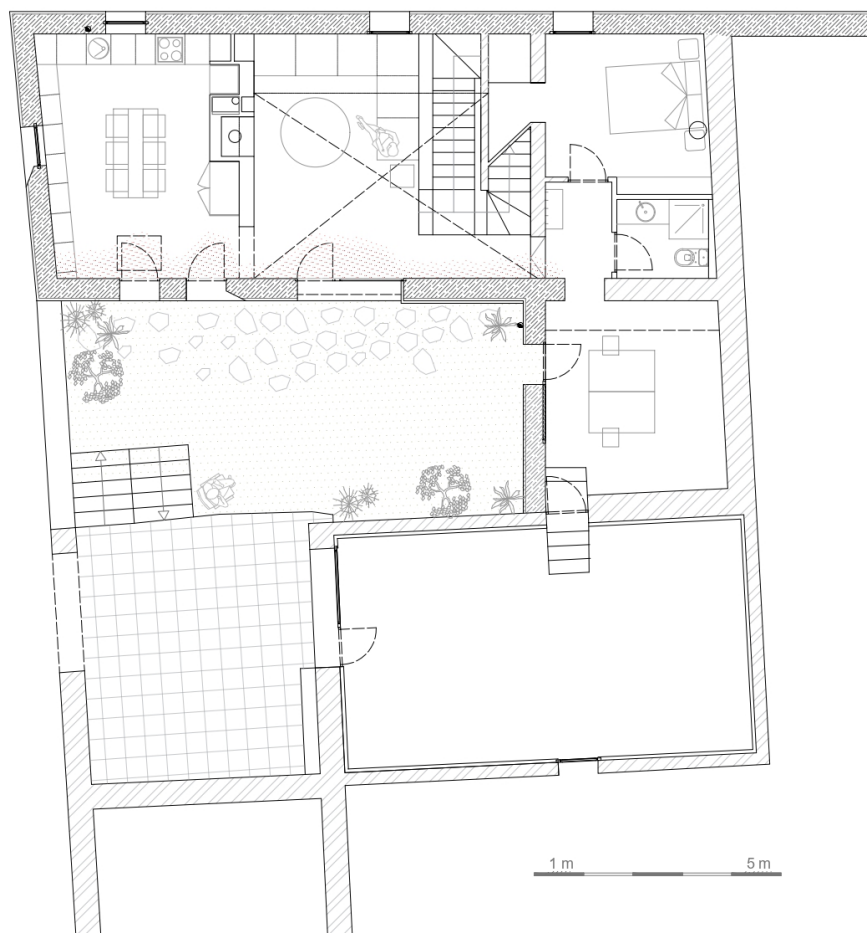


Fig. 72 Pianta piano terra.
<https://arquitectura.edraculturaynaturaleza.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

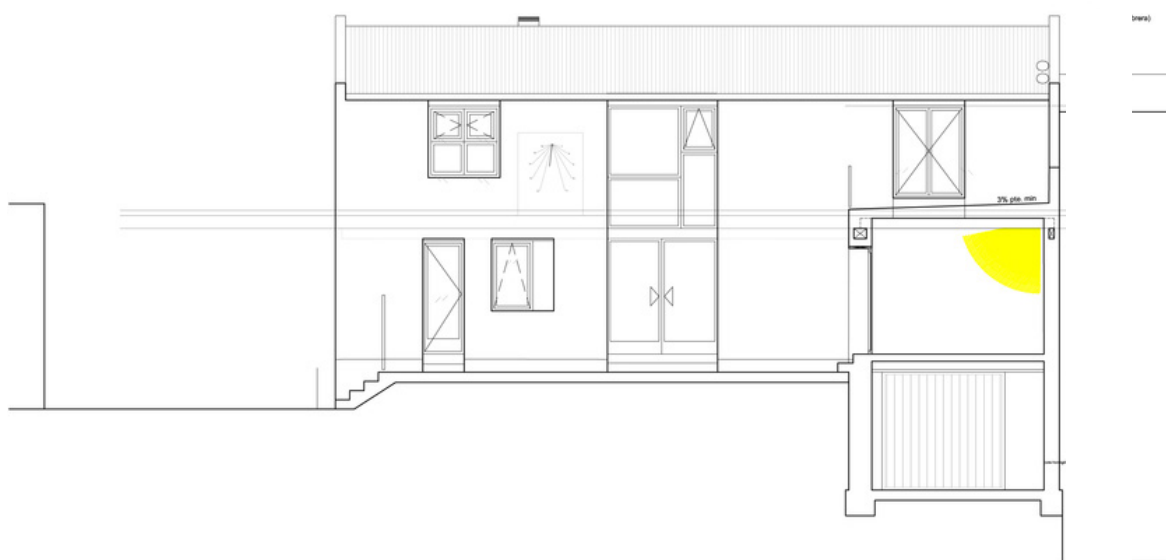


Fig. 73 Prospetto sud - rappresentazione fuori scala.

Fonte: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

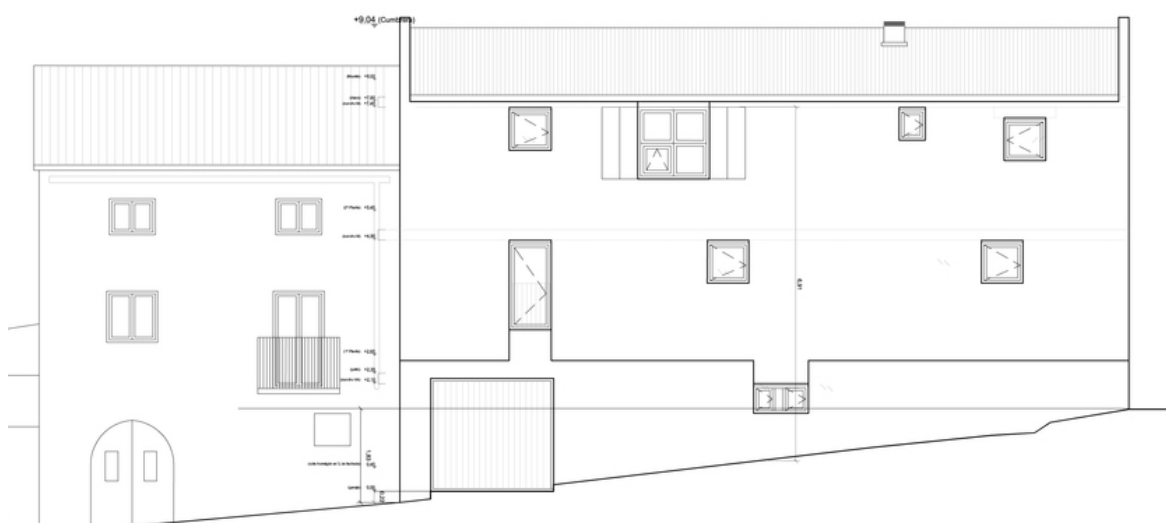


Fig. 74 Prospetto nord - rappresentazione fuori scala.

Fonte: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>



Fig. 75 Immagine del prospetto sud. Fotografia di: Xavier d'Arquer (Doblestudio)
Fonte: <https://arquitectura.edraculturaynatur.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>



Fig. 76 Immagine dell'interno della casa. Fotografia di: Xavier d'Arquer (Doblestudio)
Fonte: <https://arquitectura.edraculturaynatur.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

PROCESSO COSTRUTTIVO:

La realizzazione di Casa de Tapia impiega la tecnica moderna del “muro calicrustada”¹¹⁰, un metodo costruttivo di origine locale che prevede la stesura di uno strato di malta di calce contro le pareti del cassero prima della posa della terra¹¹¹.

Viene utilizzata terra locale non trattata, mescolata con fibre di paglia d'orzo per migliorarne le proprietà termiche. Sulle superfici esterne e interne viene applicato uno strato di calce idraulica. Questo consente di realizzare contemporaneamente il muro e i relativi intonaci durante la fase di costruzione.

In cantiere, il getto avviene all'interno di una cassaforma composta da due tavole parallele unite da traverse, all'interno della quale l'impasto di terra, paglia e calce viene versato a strati e compattato a mano mediante un compressore elettrico.

Per ridurre i costi di manodopera, l'architetto ha scelto di meccanizzare il processo, ottenendo una produttività di 2 ore per metro cubo, a fronte delle oltre 20 ore necessarie per lo stesso volume con tecniche tradizionali manuali¹¹². Si tratta di un approccio che coniuga osservazione, apprendimento e innovazione.

SISTEMI COSTRUTTIVI /:

Sistema di fondazione

La struttura d fondazione è risolta per mezzo di un solaio seminterrato costruito in calcestruzzo in cui sono presenti il garage e il locale caldaia¹¹³.

Muri perimetrali:

I muri perimetrali portanti in terra battuta hanno uno spessore di 45 cm¹¹⁴. Questi sono costruiti su una soletta di travetti in cemento armato precompresso e tornitura in ceramica. Il muro in terra battuta è un muro monolitico realizzato con un impasto misto di terra, paglia e croste di malta di calce idraulica.

A partire dall'esterno il muro è così composto:

- Strato di malta di calce
- Muro in terra battuta e paglia sp. 45 cm
- Tirante in acciaio: questi garantiscono un migliore rinforzo strutturale al muro portante perimetrale in quanto conferiscono alla struttura un comportamento scatolare e monolitico.

110 Edra Arquitectura, *Casa de Tapia ad Ayerbe*, “in Edra Arquitectura Km 0”, <https://arquitectura.edraculturaynaturaleza.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

111 Angels Castellarnau Visus, *Una casa vernacolare contemporanea*, “in amàco”, 2014. <https://amaco.org/une-maison-vernaculaire-contemporaine-angels-castellarnau-visus/>

112 Irene Santiago Trabado, *La terra battuta come costruzione vernacolare del 21° secolo*. Edra e Angeli Castellarnau, "in airearQ ", 3 aprile 2018. <https://yrenadabrahma.wixsite.com/airearq/post/el-tapial-como-construcci%C3%B3n-vern%C3%A1cula-del-s.xxi.-edra-y-angels-castellarnau>

113 Edra Arquitectura, *Casa de Tapia ad Ayerbe*, "in Edra Arquitectura Km 0", <https://arquitectura.edraculturaynaturaleza.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

114 Casa vernacolare del 21° secolo / Edra arquitectura km0, "in ArchDaily", 06 agosto 2016.
<https://www.archdaily.cl/cl/792766/casa-vernacula-del-siglo-xxi-edra-arquitectura-km0>



Immagini di cantiere



Fig 77. Compattazione della terra nel cassero mediante martello pneumatico.
Fonte: <https://amaco.org/une-maison-vernaculaire-contemporaine-angels-castellarnau-visus/>



Fig. 78 Installazione delle casseforme. Fonte: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/por-que-no-una-vivienda-de-tapia-en-el-siglo-xxi>



Fig. 79 Immagine dei blocchi in terra battuta realizzati in cantiere per la costruzione delle pareti.
Fonte: <https://amaco.org/une-maison-vernaculaire-contemporaine-angels-castellarnau-visus/>



Fig. 80. Immagine del cantiere in corso. Fonte: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/por-que-no-una-vivienda-de-tapia-en-el-siglo-xxi>

tico, che assicura una maggiore solidità e resistenza nei confronti delle azioni orizzontali causate dal vento o dai terremoti¹¹⁵ ;

- Strato di malta di calce

Finiture interne:

Le finiture interne sono realizzate con intonaci in argilla locale¹¹⁶.

I pavimenti sono in legno di pino isolati con pannelli di sughero naturale.

Sono tutti materiali naturali che possono essere poi, reintrodotti direttamente in natura alla fine della vita utile dell'edificio.

Sistema di copertura:

Il sistema di copertura è realizzato in tavole di legno e piastrelle di ceramica, presenta inoltre, uno strato di coibentazione in sughero di spessore 10 cm¹¹⁷ per evitare dispersioni di calore durante l'inverno e surriscaldamento in estate.

Aperture e ventilazione naturale:

La casa si trova su un terreno rettangolare. A sud si apre un cortile che permette la cattura passiva della luce e calore del sole attraverso grandi aperture, i lucernari e le pareti. Sulle facciate nord e ovest, sono realizzate semplici aperture tradizionali per ottenere una ventilazione incrociata naturale.

Le finestre aperte sulle facciate nord e ovest sono caratterizzate da persiane interne in legno¹¹⁸. Le finestre a sud sono dotate di tende interne e persiane esterne in legno. Entrambi le soluzioni adottate sono strategie tradizionali, adattate al clima locale.

SOLUZIONI SOSTENIBILI e EFFICIENZA ENERGETICA:

Analisi ciclo di vita:

L'analisi del ciclo di vita svolto da parte dallo studio ha rilevato una diminuzione del 50%¹¹⁹ delle emissioni di CO₂. Tant'è che l'80% dei materiali utilizzati per la realizzazione dell'abitazione, sono materiali naturali di provenienza locale come pietre, terra e paglia, utilizzando senza l'aggiunta di additivi nella miscela.

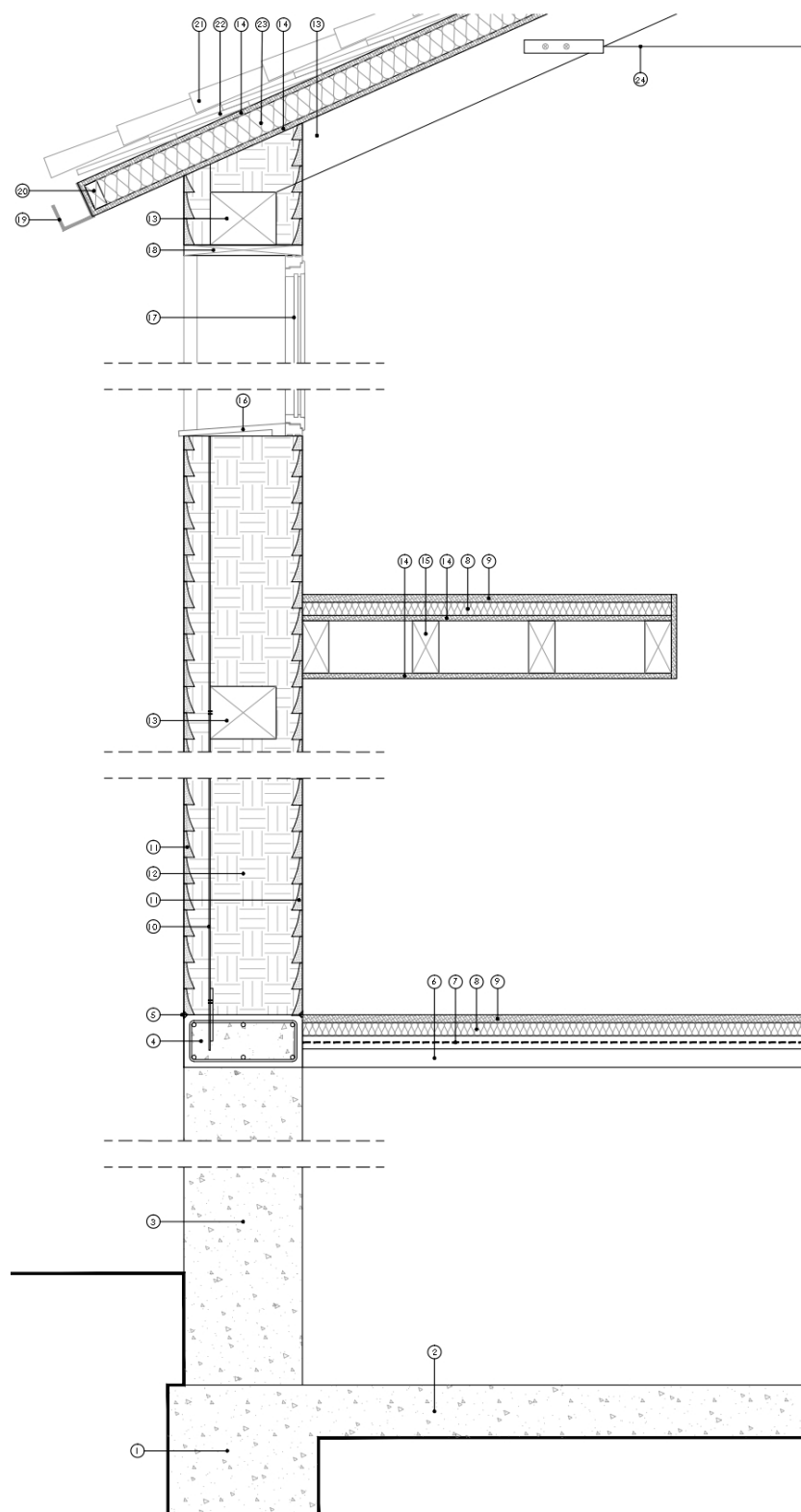
115 *Tiranti e catene nelle murature: progettazione e funzioni*, in "Blblus", 17 giugno 2024. <https://biblus.acca.it/tiranti-e-catene-nelle-murature-progettazione-e-funzioni/>

116 *Casa vernacolare del 21 ° secolo / Edra arquitectura km0*, "in ArchDaily", 06 agosto 2016. <https://www.archdaily.cl/cl/792766/casa-vernacula-del-siglo-xxi-edra-arquitectura-km0>

117 Edra Arquitectura, *Casa de Tapia ad Ayerbe*, "in Edra Arquitectura Km 0", <https://arquitectura.edraculturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

118 *Casa vernacolare del 21 ° secolo / Edra arquitectura km0*, "in ArchDaily", 06 agosto 2016. <https://www.archdaily.cl/cl/792766/casa-vernacula-del-siglo-xxi-edra-arquitectura-km0>

119 Edra Arquitectura, *Casa de Tapia ad Ayerbe*, "in Edra Arquitectura Km 0", <https://arquitectura.edraculturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>



1. Fondazione in calcestruzzo
2. Soletta in calcestruzzo 20 cm
3. Calcestruzzo massivo 45 cm
4. Cordolo in calcestruzzo 20 cm
5. -
6. Mattoni di 7 cm
7. Strato di compressione 5 cm
8. Isolamento in sughero 5 cm
9. Tavola di legno 3 cm
10. Tirante in acciaio
11. Strato di malta di calce
12. Muro in terra e paglia 45 cm
13. Trave di legno 20x25 cm
14. Tavola di legno 3 mc
15. Trave di legno 10x20 cm
16. Lamiera di gronda
17. Infissi in legno + vetro di tipo
18. "climalit"
19. Architrave di legno 4 cm
20. Canale in acciaio galvanizzato
21. Trave di legno 10x5 cm
22. Piastrella in ceramica
23. Listello di legno
24. Isolamento in sughero 10 cm
25. Tirante

Fig. 81 Sezione di dettaglio terra - cielo, rappresentazione fuori scala.
<https://arquitectura.edraculturaynaturaleza.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

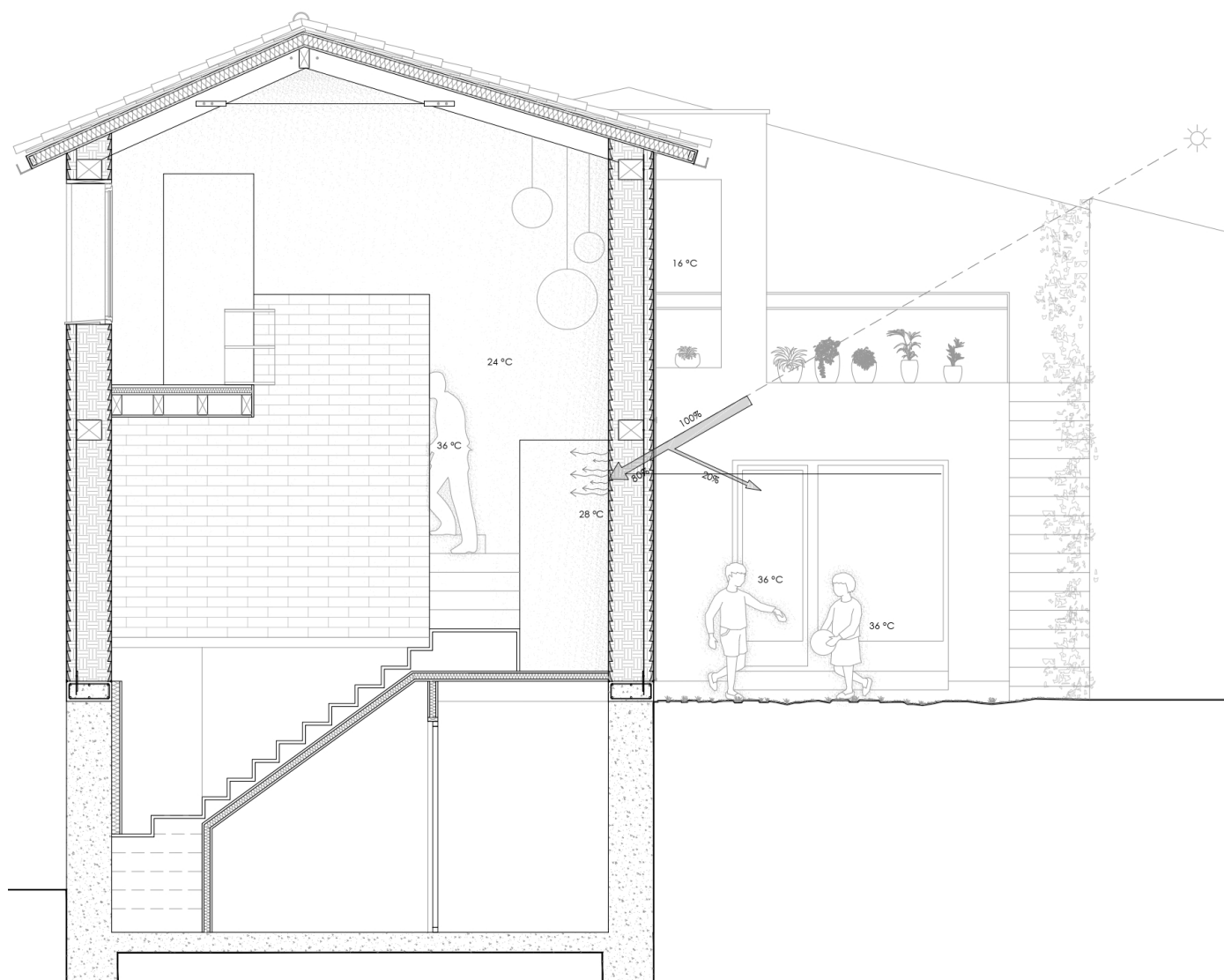


Fig. 82 Sezione trasversale con indicazione delle temperature interne degli ambienti. Rappresentazione fuori scala.
<https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

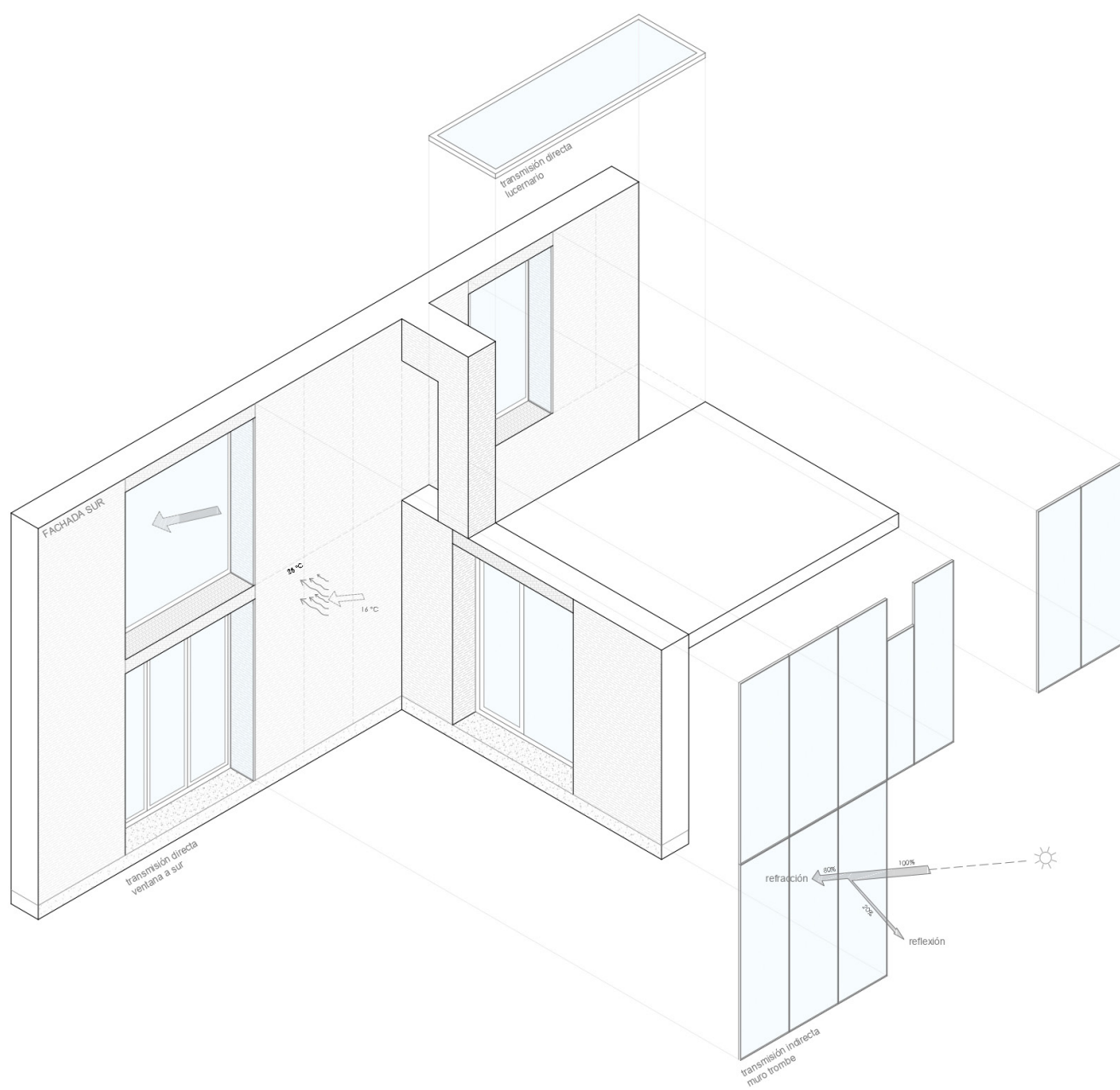


Fig. 83 Assonometria bioclimatica.
<https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

Comfort termico:

Il design solare passivo, la combinazione di grandi finestre sulla facciata sud, più piccole a nord e i lucernari garantiscono comfort termico, luce naturale e ventilazione incrociata¹²⁰. I principi di progettazione passiva adottati massimizzano l'accesso alla luce solare attraverso la facciata sud e migliorano i benefici termici delle pareti in terra.

Durante la stagione estiva, i muri in terra cruda, grazie alla loro elevata inerzia termica, assorbono il calore accumulato nelle ore diurne per rilasciarlo gradualmente durante la notte, contribuendo così al comfort interno¹²¹. A supporto di questa proprietà, sono stati integrati elementi di protezione come grondaie e tapparelle in legno, utili a schermare l'irraggiamento solare diretto e a limitare il surriscaldamento degli ambienti. Questa combinazione di soluzioni ottimizza la risposta termica dell'edificio, sfruttando il naturale ritardo termico dei materiali impiegati.

La strategia di Casa de Tapia consiste nel captare passivamente l'energia dal clima (che arriva stagionalmente) e accumularla nell'edificio stesso in modo da coprire le esigenze di comfort interno dell'abitazione.

In inverno, il calore viene immagazzinato nelle pareti di terra durante il giorno e trasmesso agli spazi interni durante la notte. In estate, i sistemi di ombreggiamento come le grondaie o le tende in legno impediscono alla luce di entrare all'interno della casa.

Caratteri di Bioedilizia:

La casa presenta dettagli in bioedilizia come finestre appositamente studiate per un maggiore utilizzo della luce e persiane scorrevoli termo protettive, inoltre nel cortile è stata collocata una cisterna sotterranea per il riutilizzo dell'acqua piovana. Una caldaia per riscaldamento a biomassa riscalda la casa e produce l'acqua calda necessaria.

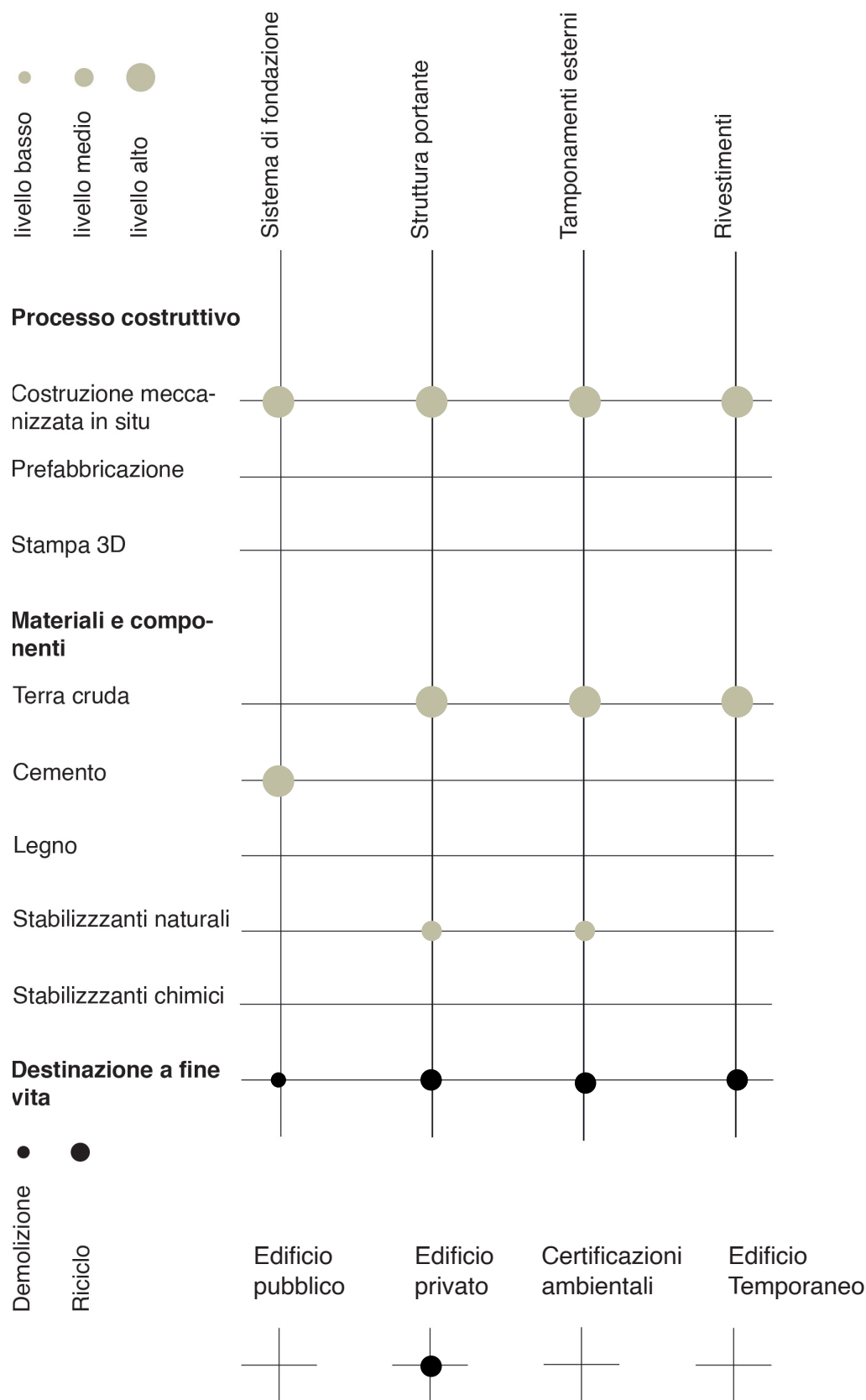
120 Edra Arquitectura, *Casa de Tapia ad Ayerbe*, "in Edra Arquitectura Km 0", <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

121 Irene Santiago Trabado, *La terra battuta come costruzione vernacolare del 21° secolo*. Edra e Angeli Castellarnau, "in airearQ", 3 aprile 2018. <https://yrenadabrahma.wixsite.com/airearq/post/el-tapial-como-construcci%C3%B3n-vern%C3%A1cula-del-s.xxi.-edra-y-angels-castellarnau>



Fig 84 Immagine in cui si mostra sistemi di protezione dal sole adottati nei mesi estivi.
Fonte: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

Scheda riassuntiva



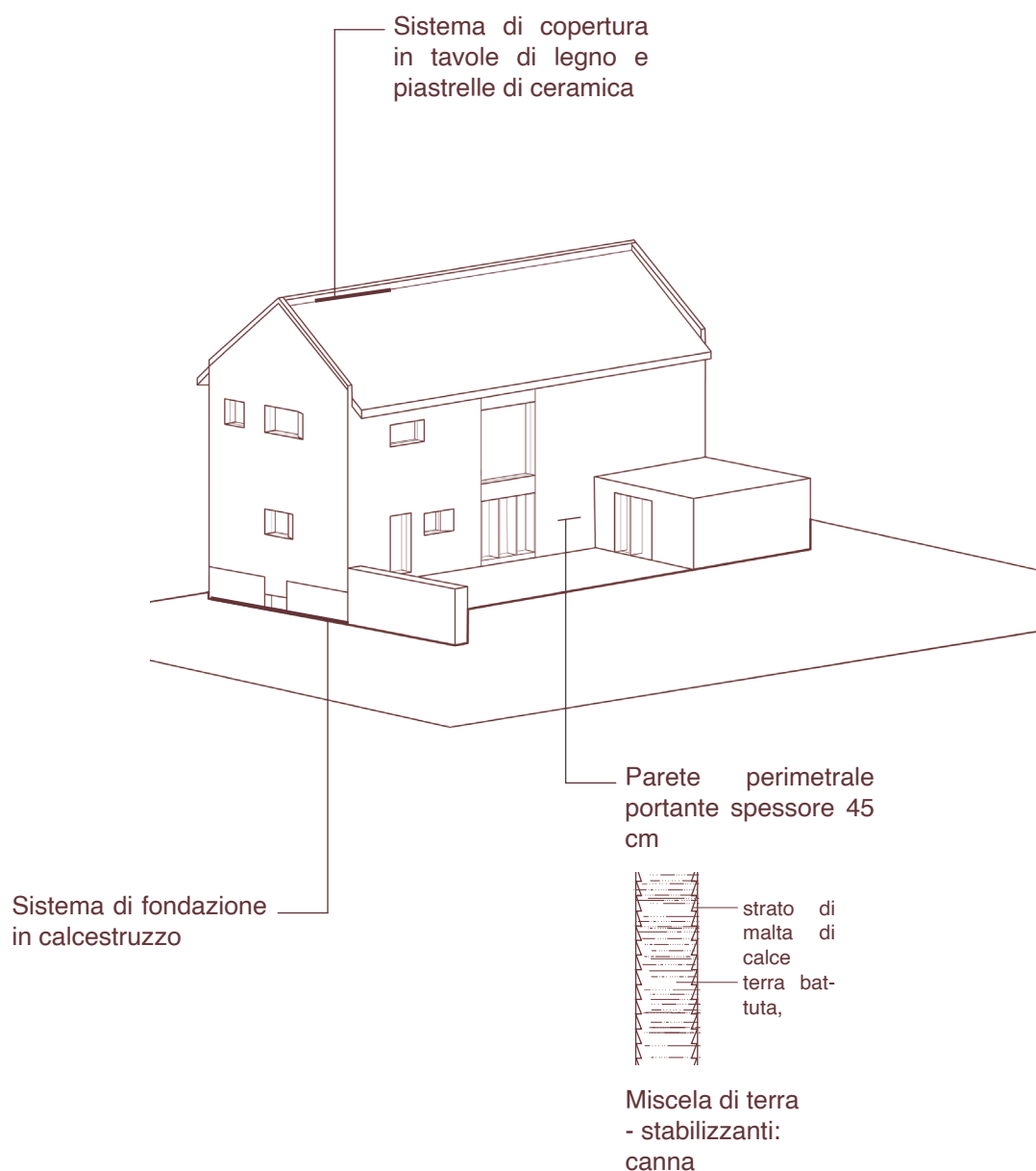


Fig. 85 Rappresentazione schematica di Casa de Tapia con indicazioni delle principali caratteristiche costruttive adottate. Elaborazione personale.

Casa de Tapia è un progetto che vede l'utilizzo diffuso della costruzione meccanizzata in situ per tutte le componenti principali dell'edificio. La terra cruda è impiegata in modo consistente nella struttura portante, nei tamponamenti e nei rivestimenti, con un impiego limitato di cemento utilizzato nelle fondazioni e stabilizzanti naturali presente nella miscela di terra. Il progetto prevede una completa riciclabilità dei materiali a fine vita, come indicato dalla presenza dei marcatori neri pieni su tutte le componenti. L'edificio è identificato come privato, privo di certificazioni ambientali e non temporaneo.

CIMITERO BUSHEY, 2017 (Inghilterra)

Tipologia costruttiva:

Edificio cimiteriale

Area:

670 m²

Luogo:

Hertfordshire, Inghilterra

Anno:

2017

N piani:

1

Certificati

-

Premi:

- Finalista del Premio Stirling 2018
- Premio Nazionale RIBA 2018
- Premio RIBA Est 2018
- 2017 WAF Miglior edificio religioso completato

Costo:

-

Architetto:

Waugh Thistleton Architects

Impresa Costruttrice:

Earth Structures





3.1 Processo di costruzione costruzione meccanizzata on site



Fig 86. Sala preghiera cimitero Bushey. Fotografia di Lewis Kahn tratta da: <https://www.dezeen.com/2017/11/22/waugh-thistleton-bushey-cemetery-rammed-earth-colonnade-extension-cemetery-hertfordshire-uk/#/>

IL PROGETTO/ descrizione:

Il cimitero Bushey è uno dei più importanti luoghi di sepoltura ebraici del Regno Unito e copre 16 acri all'interno della cintura verde di Londra. Gli edifici costruiti sono pensati per essere restituiti alla terra una volta che il cimitero sarà completamente occupato, (previsto tra 60 anni)¹²² restituendo così il sito alla cintura verde. Disposti lungo un asse nord-sud, gli edifici sono progettati per facilitare il movimento dei visitatori in lutto. Un colonnato di legno guida il percorso processionale verso le sale di preghiera. Le due sale di preghiera monolitiche, realizzate in terra battuta, sono il fulcro del progetto. Il progetto rappresenta il culmine di un percorso di dieci anni¹²³, sviluppato in stretta collaborazione con gli amministratori del cimitero, la comunità ebraica e i pianificatori.

Il progettista, Waugh Thistleton Architects è uno studio di progettazione architettonica con sede a Londra, noto per la realizzazione di interventi sostenibili e attentamente concepiti, sia nel contesto locale che su scala internazionale. Lo studio si distingue come uno dei principali protagonisti a livello globale nell'impiego del legno ingegnerizzato, rivestendo un ruolo pionieristico nello sviluppo di edifici multipiano in legno. L'elevata qualità progettuale delle loro opere, unita a un consolidato impegno nell'utilizzo di tecnologie costruttive sostenibili, ha contribuito a consolidare una riconosciuta reputazione internazionale nel campo dell'architettura e del design eco-compatibile¹²⁴.

MATERIA PRIMA E FILIERA DI PROVENIENZA:

Il principale materiale da costruzione adottato per la realizzazione delle sale del cimitero è la terra¹²⁵, questo crea una forte connessione con la natura ciclica della vita e della morte¹²⁶. L'utilizzo di materiale locale permette di ridurre le emissioni di trasporto.

La composizione di questi blocchi include una miscela di aggregati di cava di provenienza locale che forniscono la maggior parte della densità compattata, argilla raccolta dagli stagni presenti nelle aree più basse e umide del sito, acqua per ottenere una densità ottimale durante la compattazione, e un contenuto pari a 8 – 10% di cemento Portland¹²⁷ (a titolo di confronto, il calcestruzzo convenzionale contiene circa il 20% di cemento).

Altri materiali utilizzati per la realizzazione del complesso cimiteriale è il legno in rovere per le boiserie, legno lamellare per le travi e il colonnato, piastrelle in terra battuta e le ante delle porte in acciaio corten. Inoltre, Earth Structures Group utilizza anche un additivo impermeabilizzante a base acquosa silano/silossanico chiamato Plasticure che riduce al minimo la penetrazione dell'acqua ed elimina l'uso di rivestimenti impermeabilizzanti esterni e la futura manutenzione della superficie¹²⁸.

122 Johanna Gibbons, Victoria Black, *Bushey New Jewish Cemetery*, in "Biennial Internacional de paisatge barcelona", <https://landscape.coac.net/en/node/230>

123 ArchDaily, *Bushey Cemetery / Waugh Thistleton Architects*, in "ArchDaily", 4 settembre 2018. <https://www.archdaily.com/901249/bushey-cemetery-waugh-thistleton-architects>

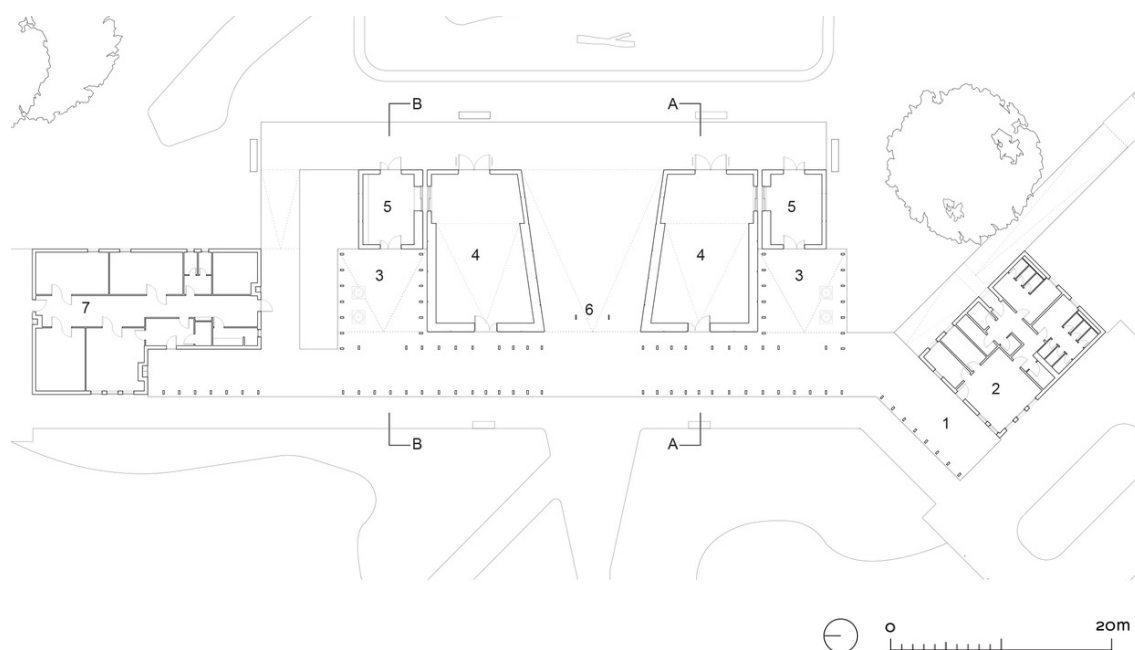
124 Waugh Thistleton Architects in "Waugh Thistleton Architects". <https://waughthistleton.com/>

125 ArchDaily, *Bushey Cemetery / Waugh Thistleton Architects*, in "ArchDaily", 4 settembre 2018. <https://www.archdaily.com/901249/bushey-cemetery-waugh-thistleton-architects>

126 Alyn Griffiths, Waugh Thistleton completa gli edifici cimiteriali con muri in terra battuta, in "dezeen", 22 novembre 2017. <https://www.dezeen.com/2017/11/22/waugh-thistleton-bushey-cemetery-rammed-earth-colonnade-extension-cemetery-hertfordshire-uk/#/>

127 Informazioni su Rammed Earth, in "EARTH Structure". <https://www.earthstructuresgroup.com.au/about-rammed-earth/>

128 Informazioni su Rammed Earth, in "EARTH Structure". <https://www.earthstructuresgroup.com.au/about-rammed-earth/>



1. Punto d'incontro e area di arrivo
2. Reception
3. Area per il lavaggio delle mani
4. Sala per la preghiera

5. Stanza per i Cohanim
6. Arco per la preghiera
7. Camera mortuaria

Fig. 87 Planimetria generale.

https://www.archdaily.com/901249/bushey-cemetery-waugh-thistleton-architects?ad_medium=gallery

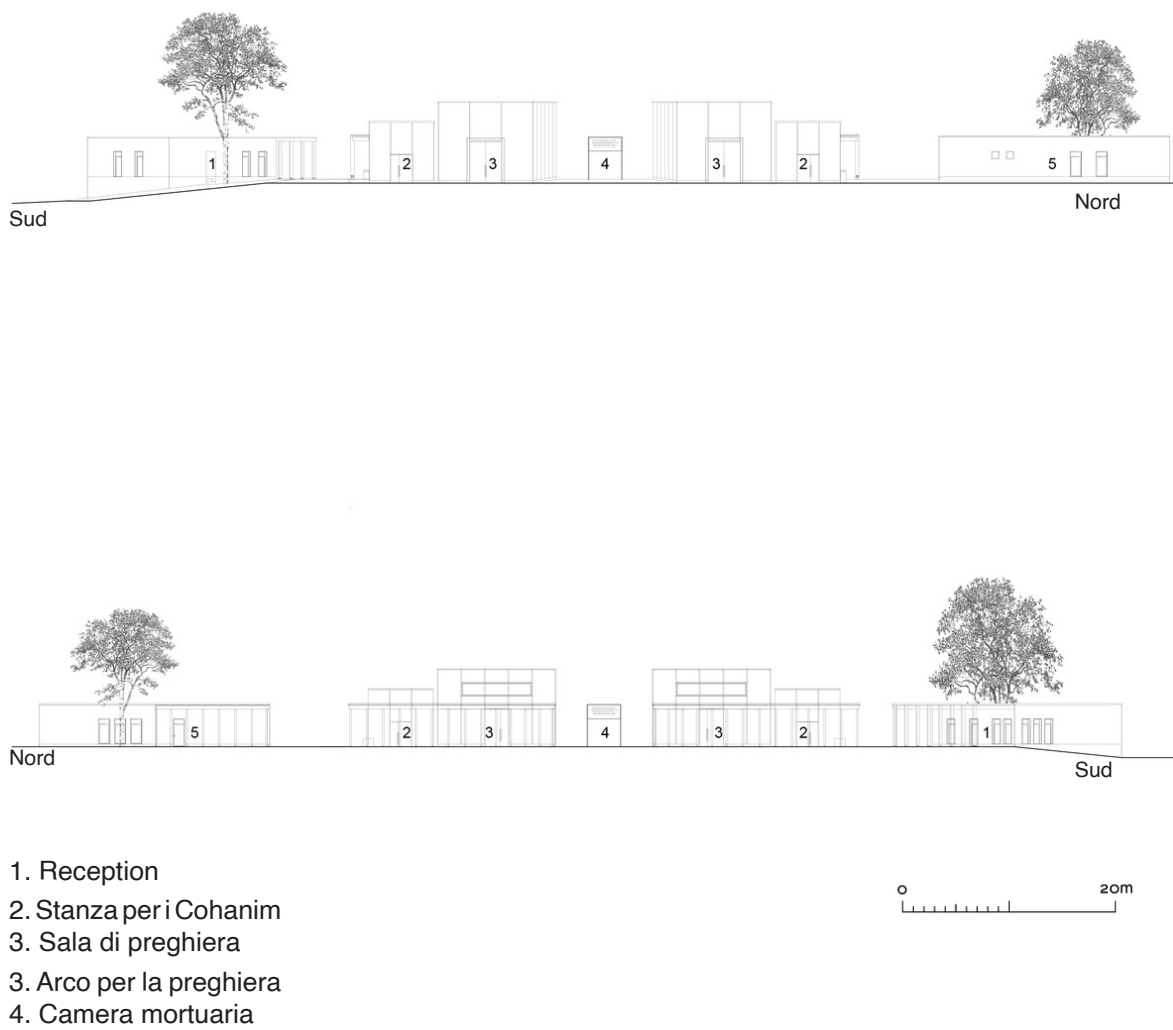


Fig. 88 Propsetti nord- sud Cimitero Bushey. Fonte: <https://www.archdaily.com/901249/bushey-cemetery-waugh-thistle-ton-architects/5b8c25fdf197cca2e20005cd-bushey-cemetery-waugh-thistle-ton-architects-elevations>



Fig. 89 Immagine degli edifici del cimitero Bushey.

Fonte: <https://www.dezeen.com/2017/11/22/waugh-thistleton-bushey-cemetery-rammed-earth-colonnade-extension-cemetery-hertfordshire-uk/>

PROCESSO COSTRUTTIVO

Durante le prime fasi del progetto, l'architetto Waugh Thistleton, consapevole della sua limitata esperienza nella tecnica della costruzione in terra battuta, si rivolse a Earth Structures, un'impresa specializzata in costruzione in terra con sede in Australia occidentale. Questa azienda fu incaricata di realizzare una sezione campione della parete utilizzando blocchi di terra battuta stabilizzata spessi 50 cm. Questo processo ha permesso di valutare le qualità estetiche e strutturali del materiale.

I lavori di costruzione iniziarono ad Aprile 2016¹²⁹, solo dopo che il campione di muro fu approvato dall'ente committente, United Synagogues.

Il progetto è stato realizzato in due fasi. La fase iniziale dei lavori di abilitazione ha comportato l'installazione di importanti opere di ingegneria civile e paesaggistica, in cui sono state introdotte una serie di avvallamenti, sbarramenti e stagni per aiutare a mantenere il drenaggio naturale del sito e fornire nuovi habitat per la fauna selvatica. La seconda fase ha visto la costruzione delle sale di preghiera e degli edifici associati¹³⁰.

Il cantiere è stato seguito da quattro tecnici di Earth structures Group che giunsero dall'Australia sul sito del progetto. Il team si focalizzò, nelle prime settimane, sulla raccolta dei materiali necessari e sulla formazione di una forza lavoro locale. La fase di cantiere più complessa iniziò a partire dal mese di maggio, quando si cominciò a miscelare i vari ingredienti in loco con l'ausilio di due pale meccaniche Bobcat. La cassaforma necessaria per la costruzione delle pareti fu spedita in un unico container dall'Australia e, nell'arco di una settimana dall'arrivo, fu completato il primo strato del muro.

La cassaforma stessa è realizzata utilizzando telai in acciaio ad incastro rivestiti con compensato marino rivestito in resina epossidica. La cassaforma è riutilizzabile per molte centinaia di edifici con le facce sostituite solo ogni pochi anni. Pertanto, non vi è alcuno spreco di cassaforma in cantiere.

L'intera struttura in terra battuta, comprendente quattro edifici, fu realizzata in un periodo di dieci settimane. Il processo di produzione delle pareti in terra battuta vede l'inserimento degli strati di terra in casseforme di alluminio e compressi con costipatori pneumatici ad alta velocità¹³¹ fino a raggiungere un'altezza di 15 cm. Le casseforme poi vengono rimossi dopo 24 ore, nel momento in cui la miscela si solidifica. Le unità di terra realizzate misurano 2,2 metri di lunghezza e 40 cm di spessore e ciascuna unità è composta da sei strati di terra compressa¹³², che sono appena visibili sulla superficie del manufatto finito. Gli edifici principali sono incorniciati da un colonnato in legno lamellare di larice alto 3,5 metri. Le colonne in legno sono fissate alla base con tasselli in acciaio, collegati a una piastra in acciaio per formare un giunto rigido e stabile. Le pareti si estendono sopra il colonnato, con una finestra lunga sei metri che consente l'ingresso della luce occidentale nell'area della

com.au/about-rammed-earth/

129 *Cimitero di Bushey*, in "ElliottWood. <https://www.elliottwood.co.uk/featured/bushey-cemetery>

130 Ibidem

131 Informazioni su Rammed Earth, in "EARTH Structure". <https://www.earthstructuresgroup.com.au/about-rammed-earth/>

132 Polvere alla polvere: Bushey New Cemetery, Hertfordshire, Regno Unito, di Waugh Thistleton Architects, in "The Architectural Review". <https://www.architectural-review.com/buildings/sacred-space/dust-to-dust-bushey-new-cemetery-hertfordshire-uk-by-waugh-thistleton-architects>



Immagini di cantiere



Fig. 90 Immagini del cantiere in opera.

Fonte: <https://waughthistleton.com/news/17/11/17/buhey-wins-world-architecture-festival/>

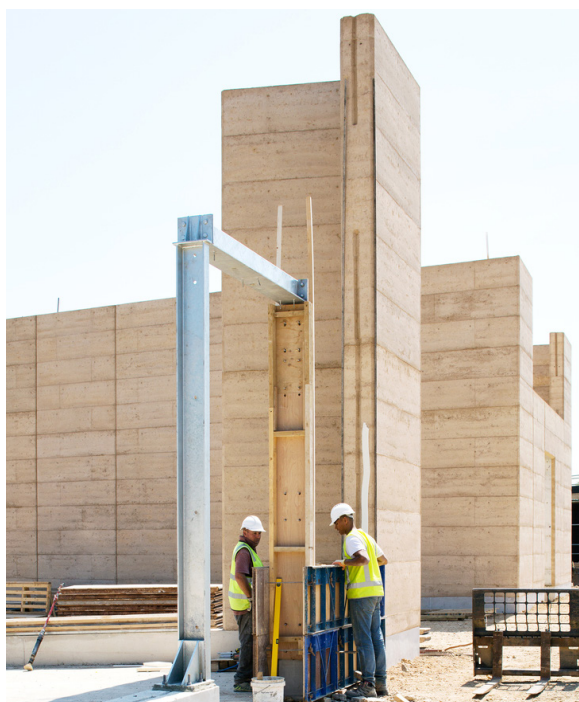


Fig. 91 Montanti in acciaio sono stati integrati nelle pareti in terra battuta per sostenere le grandi aperture destinate alle porte in acciaio Cor-ten delle sale di preghiera. Fotografia di Lewis Khan



Fig. 92 Immagine del cantiere in opera. Fotografia di Lewis Khan. Fonte: <https://www.archdaily.com/901249/bushey-cemetery-waugh-thistleton-architects>.

congregazione.

SISTEMI COSTRUTTIVI:

Pareti perimetrali / sistema di fondazione:

Le pareti in terra battuta stabilizzata hanno una funzione portante e sono costruite direttamente sul posto. Hanno uno spessore di 40 cm e poggiano su un basamento in cemento alto 22,5 cm¹³³. Le fondazioni oltre a fornire una solida base di appoggio e contribuiscono a creare un elemento visivo distintivo in tutto il sito.

Aperture:

Le aperture sono incorniciate da montanti in acciaio annegati nella terra battuta e fissati con resina e bulloni in acciaio.

Sistema di copertura:

La copertura è costituita da un tetto in zinco aggraffato che scende verso la parte anteriore della sala di preghiera, accentuando la definizione dell'area dove la bara si trova durante le cerimonie, illuminata dalla luce naturale che filtra attraverso la finestra.

Il pavimento degrada dolcemente verso l'uscita a est, e la forma inclinata delle pareti guida il movimento della congregazione, focalizzando l'attenzione verso la bara e il rabbino.

SOLUZIONI SOSTENIBILI e EFFICIENZA ENERGETICA:

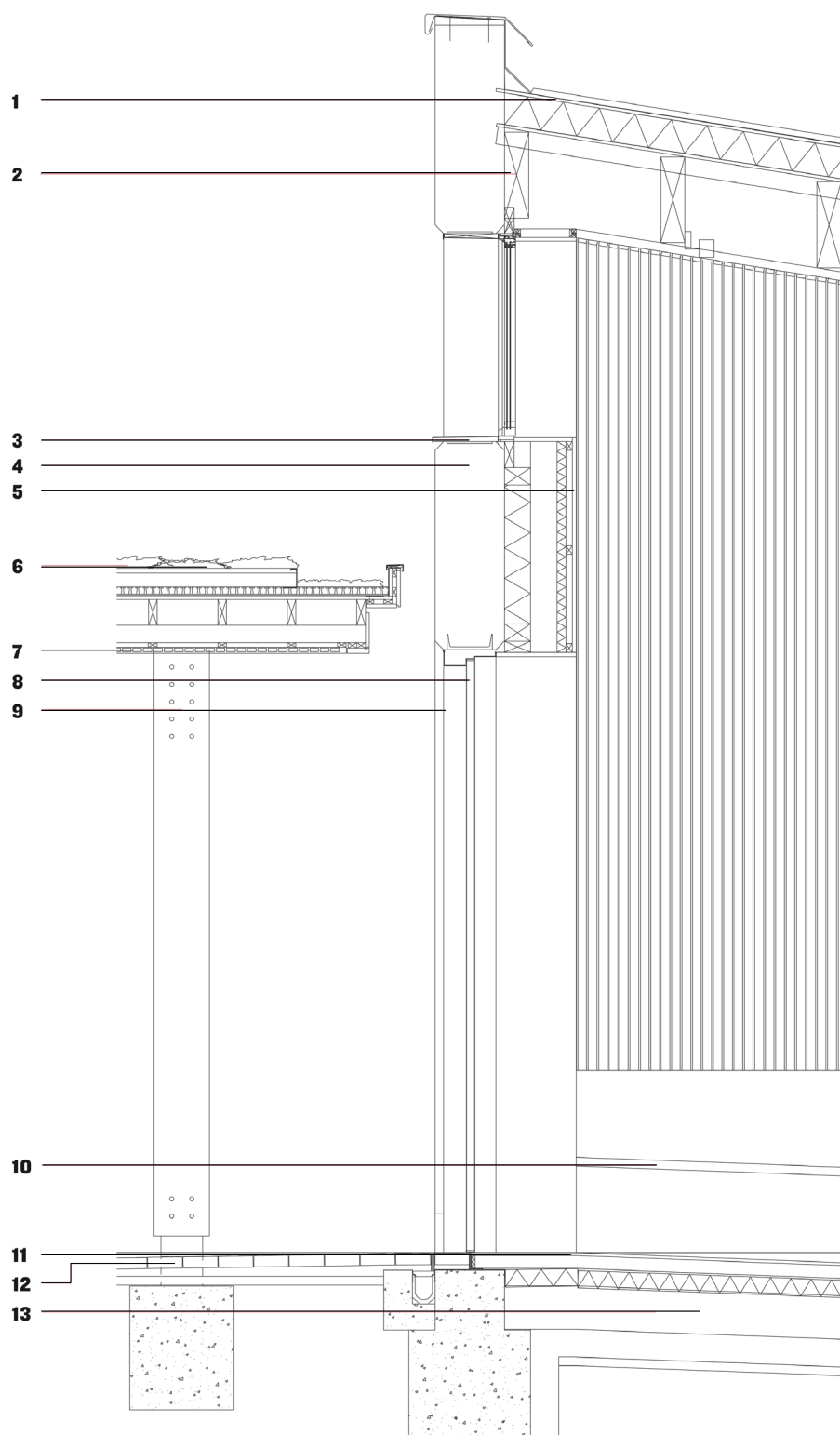
Ciclo di vita / demolizione:

Fin dalla fase di progettazione, è stato considerato il destino finale degli edifici. Si prevede che, una volta completate le sepolture e occupato l'intero sito, le strutture come, le sale di preghiera e le altre infrastrutture saranno demolite.

La scelta di utilizzare la terra battuta direttamente estratta dal sito, come materiale da costruzione, è stata una decisione sostenibile, poiché consente di reintegrare le pareti nel terreno, chiudendo il ciclo di vita del materiale in modo ecologico.

Tuttavia, l'uso del cemento nelle fondazioni e nella miscela di terra battuta limita la sostenibilità complessiva del progetto, che sarebbe stato ancora più ecologico se fossero stati utilizzati solamente materiali naturali.

¹³³ Andrew Waugh, *Return to Earth*, in "Architecture Today". <https://architecturetoday.co.uk/return-to-earth/>

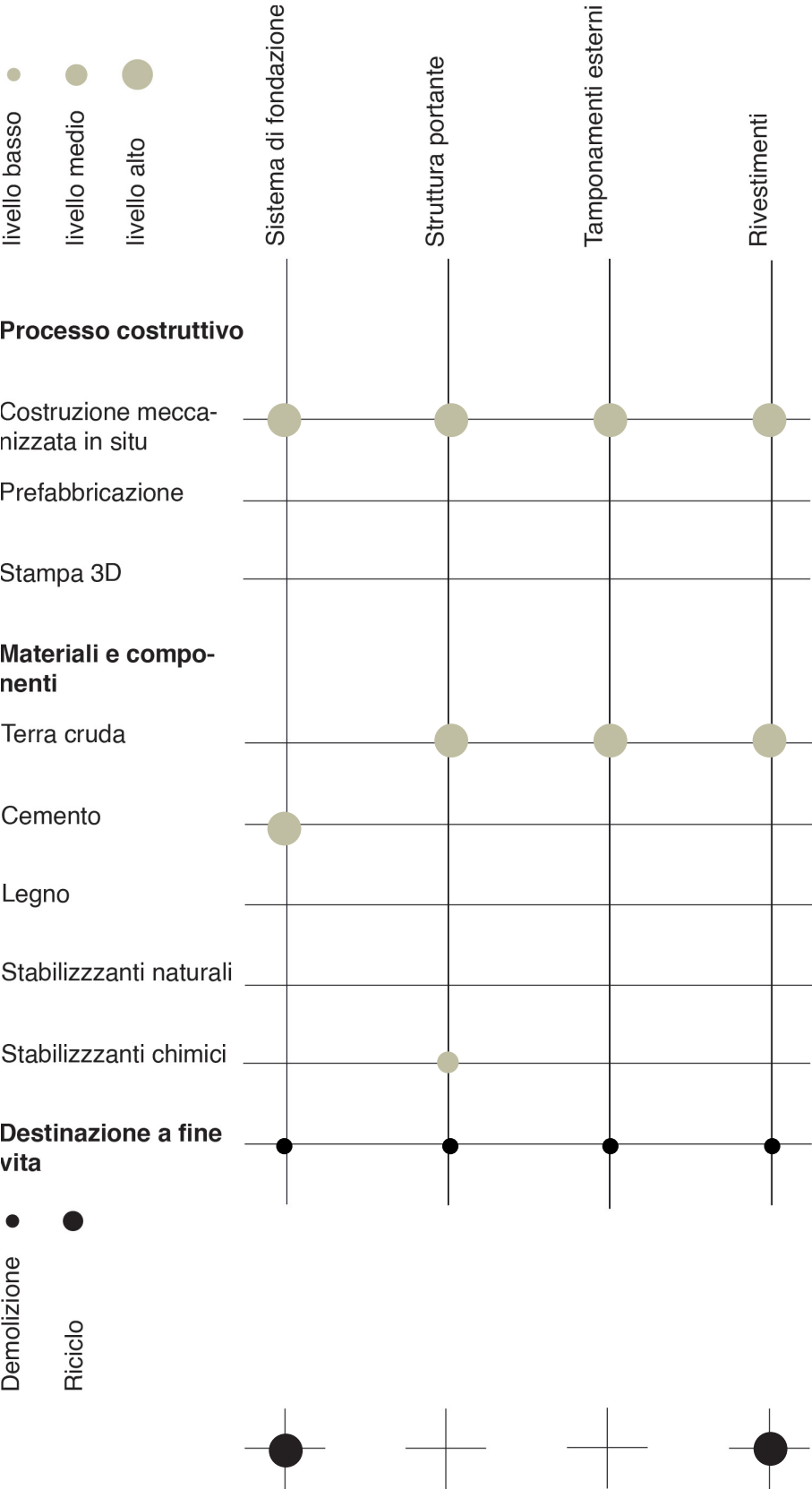


1. Tetto in zinco con aggraffatura
2. Trave lamellare
3. Soglia di bronzo
4. Muro in terra battuta
5. Doghe in rovere su listelli
6. Tetto verde
7. Doghe in larice
8. Porta in acciaio corten
9. Colonnato in legno lamellare di larice
10. Panca in rovere
11. Piastelle in cemento
12. Mattoni in argilla
13. Solaio in calcestruzzo

Fig 93. Sezione di dettaglio terra- cielo.

https://www.archdaily.com/901249/bushey-cemetery-waugh-thistleton-architects/5b8c2639f197c41930001dc-bushey-cemetery-waugh-thistleton-architects-prayer-hall-detail?next_project=no

Scheda riassuntiva



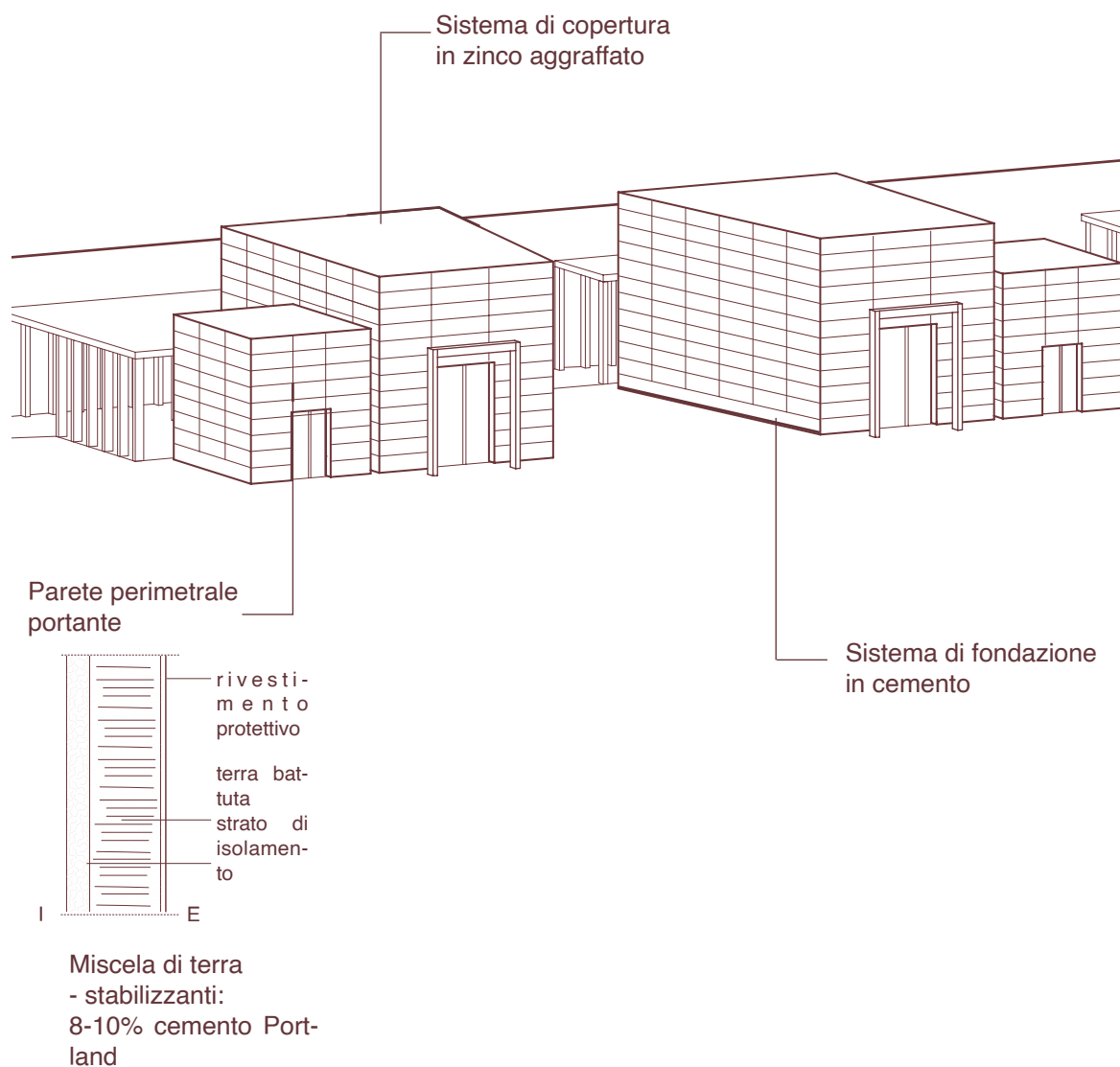


Fig. 94 Rappresentazione schematica di Cimitero Bushey con indicazioni delle principali caratteristiche costruttive adottate. Elaborazione personale.

Nel caso del Cimitero di Bushey, utilizza la terra cruda come materiale principale, lavorata con l'ausilio di strumenti meccanizzati. La costruzione è interamente realizzata on site. Il cemento, impiegato per le fondazioni e come stabilizzante nella miscela terrosa, riduce la circolarità del progetto. Il progetto è stato concepito come un intervento temporaneo, con una durata prevista di circa 60 anni.

3.2

Processo di costruzione off site

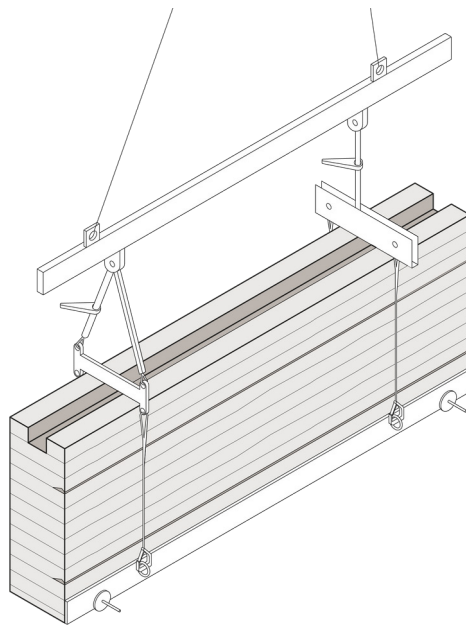


fig. 95 Immagine di un pannello prefabbricato. Fonte: <https://www.erden.at/Products>

RICOLA HERB CENTRE, 2013 (Svizzera)

Tipologia costruttiva:

Edificio industriale

Superficie:

3000 m²

Luogo:

Laufen (Basilea), Svizzera

Anno di ultimazione:

2013

N piani:

1

Certificati:

-

Premi:

-

Costo:

Costi totali di costruzione circa 13,2 milioni di euro (16 milioni di franchi svizzeri),
Costo al m³ circa 386 euro.

Architetto:

Herzog & de Meuron

Impresa Costruttrice:

Lehm Ton Erde Schweiz GmbH

Costruzione:

ERDEN wall





3.2 Processo di costruzione costruzione off site

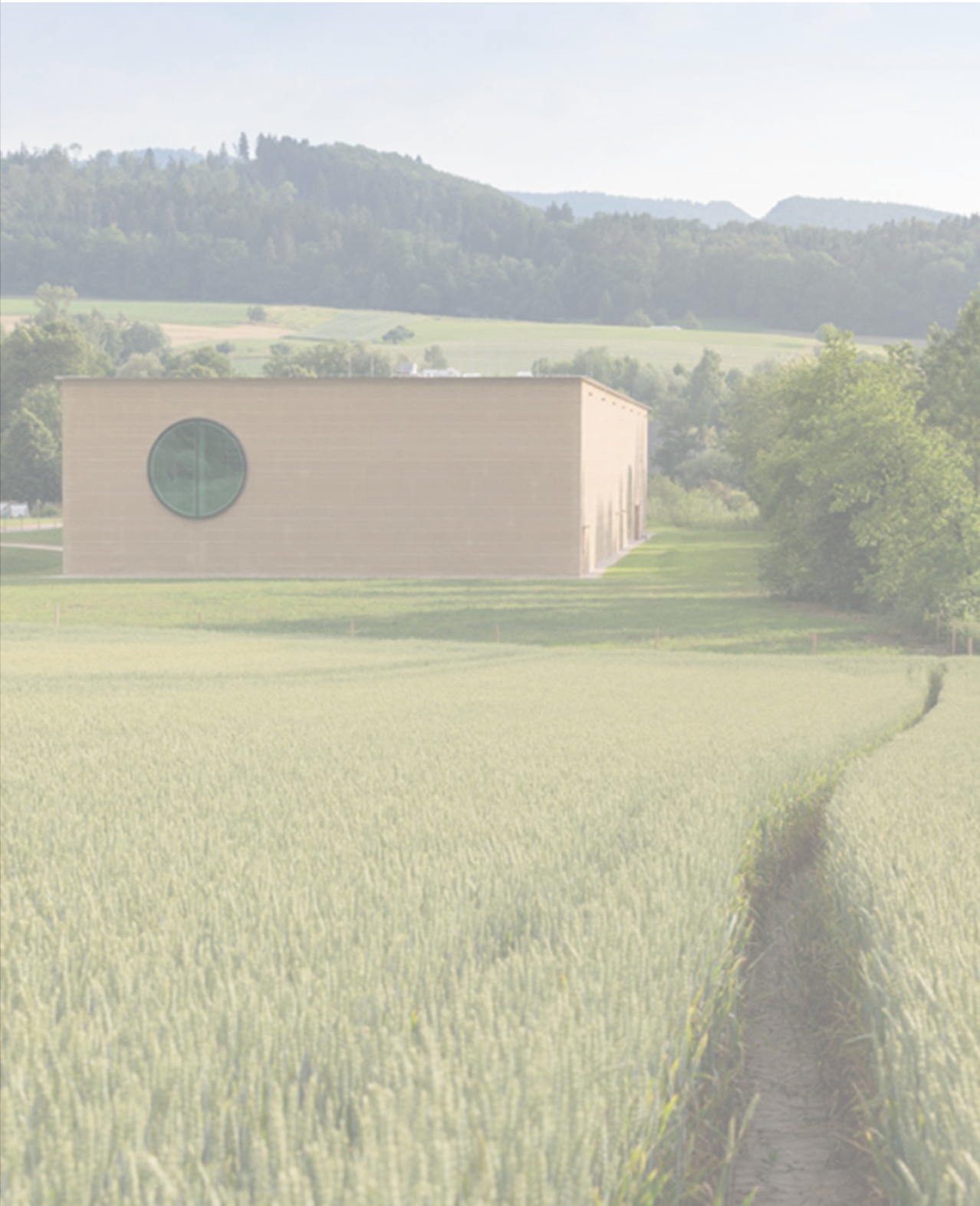


Fig. 96 Ricola Herb Centre. Fotografia di Iwan Baan
https://www.archdaily.com/634724/ricola-krauterzentrum-herzog-and-de-meuron/55627d78e58ece191b0002c3-ricola-krauterzentrum-herzog-and-de-meuron-photo?next_project=no

IL PROGETTO/ descrizione:

Il “centro per le Erbe” Ricola ubicata nella campagna di Laufen, è circondata da campi e siepi per la coltivazione biologica delle erbe necessarie alla produzione delle caramelle.

Il progetto presenta un edificio lungo oltre 100 m e alto circa 11m¹³⁴ con copertura piana e facciata in terra battuta, all'interno della quale combina le fasi coinvolte nella lavorazione industriale delle erbe, a partire dall'essiccazione, taglio, miscelazione e stoccaggio¹³⁵.

La progettazione in terra cruda si è concentrata su due aspetti fondamentali: il contributo all'efficienza energetica e la prefabbricazione dei componenti, con una costruzione sistematizzata volta a contenere tempi e costi, utilizzando risorse locali.

I progettisti, Herzog & de Meuron mostrano una visione dell'architettura in cui il materiale non è solo strumento tecnico, ma elemento espressivo, ambientale e culturale. Il loro approccio rivela una profonda attenzione all'impatto ambientale e al contesto. La loro ricerca si orienta verso l'uso consapevole e innovativo dei materiali, valorizzandone le proprietà fisiche e sensoriali, come nella stampa su cemento o nell'osservazione estetica e biologica dei muschi e licheni. Questo atteggiamento evidenzia un'architettura che si fonde con la natura, minimizzando l'impatto ambientale e promuovendo soluzioni costruttive intelligenti e durature¹³⁶.

MATERIA PRIMA E FILIERA DI PROVENIENZA:

La miscela adottata per la realizzazione dei blocchi di terra è composta da argilla, marna e materiale di scavo, tra cui materiale lapideo.

Non essendo stati utilizzati stabilizzanti, la robustezza dei muri in terra battuta è ottenuta esclusivamente dalla compattazione e l'incastro del materiale lapideo con granulometria di diametro fino a 30 mm¹³⁷.

“Questo materiale di scavo vagliato ha un'eccellente qualità nella curva di vagliatura per la creazione di pareti portanti”, afferma Martin Rauch¹³⁸.

Inoltre, tutti i materiali da costruzione utilizzati per la realizzazione dell'azienda Ricola provengono tutti da fonti locale, da un raggio circa di 8-10 km¹³⁹: la ghiaia e la sabbia sono stati recuperati da una cava vicino, l'argilla è stata estratta dall'area circostante Laufen e la terra è stata presa direttamente dallo scavo di fondazione dell'edificio.

PROCESSO COSTRUTTIVO / costruzione prefabbricata off site

134 Thomas Wieckhorst, Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen, in “bauhandwerk”, ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflehmbau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

135 369 Ricola Kräuterzentrum, in “herzogdemeuron”. <https://www.herzogdemeuron.com/projects/369-ricola-krauterzentrum/>

136 Jacques Herzog and Pierre de Meuron 2001 Laureates, in “The Pritzker Architecture Prize”. https://www.pritzkerprize.com/sites/default/files/inline-files/2001_bio.pdf

137 Thomas Wieckhorst, Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen, in “bauhandwerk”, ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflehmbau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

138 Ibidem.

139 SRF Radiotelevisione Svizzera, Centro Erboristeria Ricola, Laufen, in “VOGT” 27 giugno



Fig. 97 I materiali utilizzati nella miscela di terra per la prefabbricazione dei blocchi. Foto: <https://www.haascookzemmrh.com/en/rojekte/alnatura-campus-en/>



Fig. 98 La terra stoccata nello stabilimento off site. Fonte: <https://www.materialtimes.com/en/our-focus/rammed-earth---the-amazing-clay-architecture-of-martin-rauch-1.html>

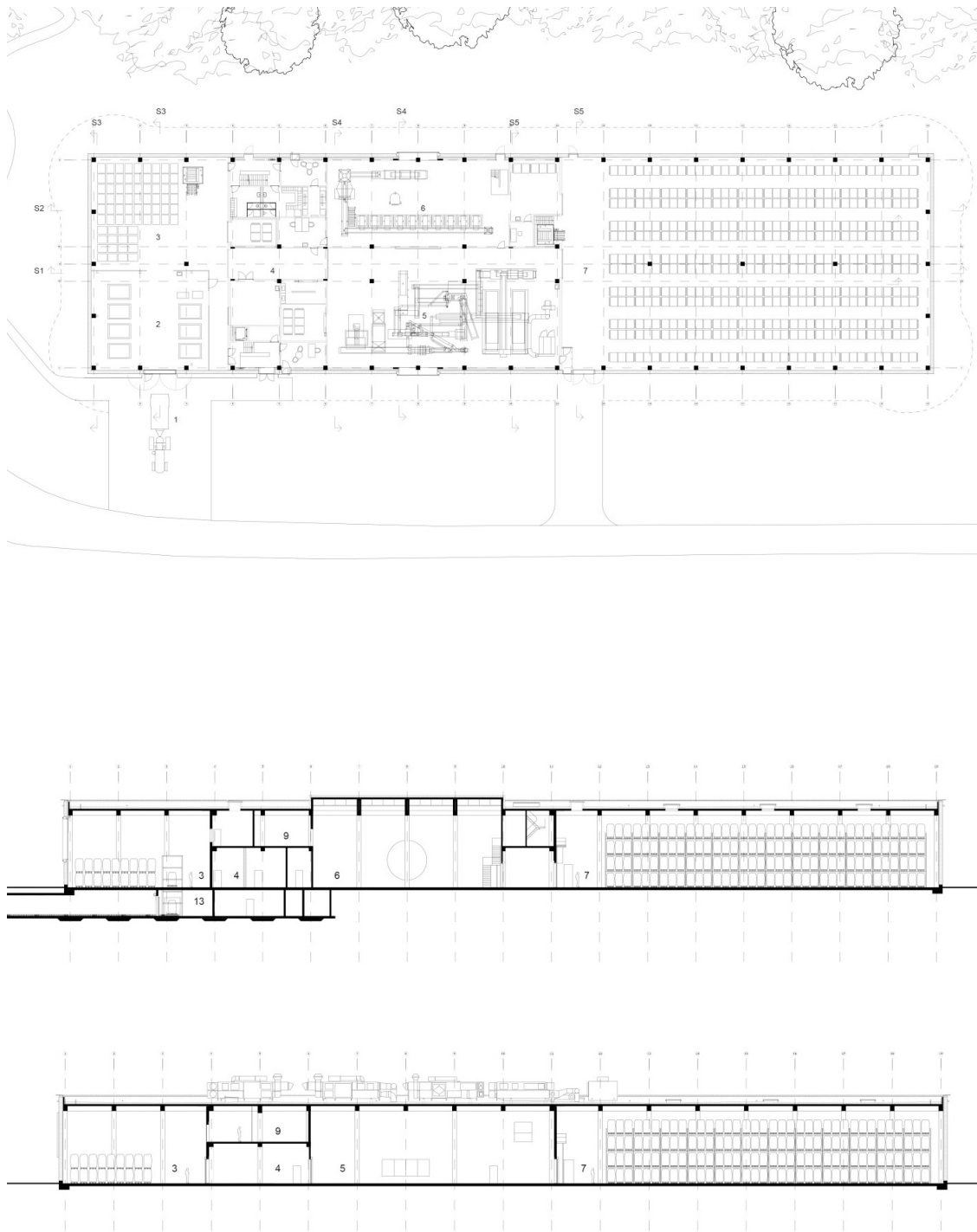


Fig. 99 Pianta piano terra e sezioni trasversali. Rappresentazione fuori scala.
<https://www.herzogdemeuron.com/projects/369-ricola-krauterzentrum/lightbox/30320/>

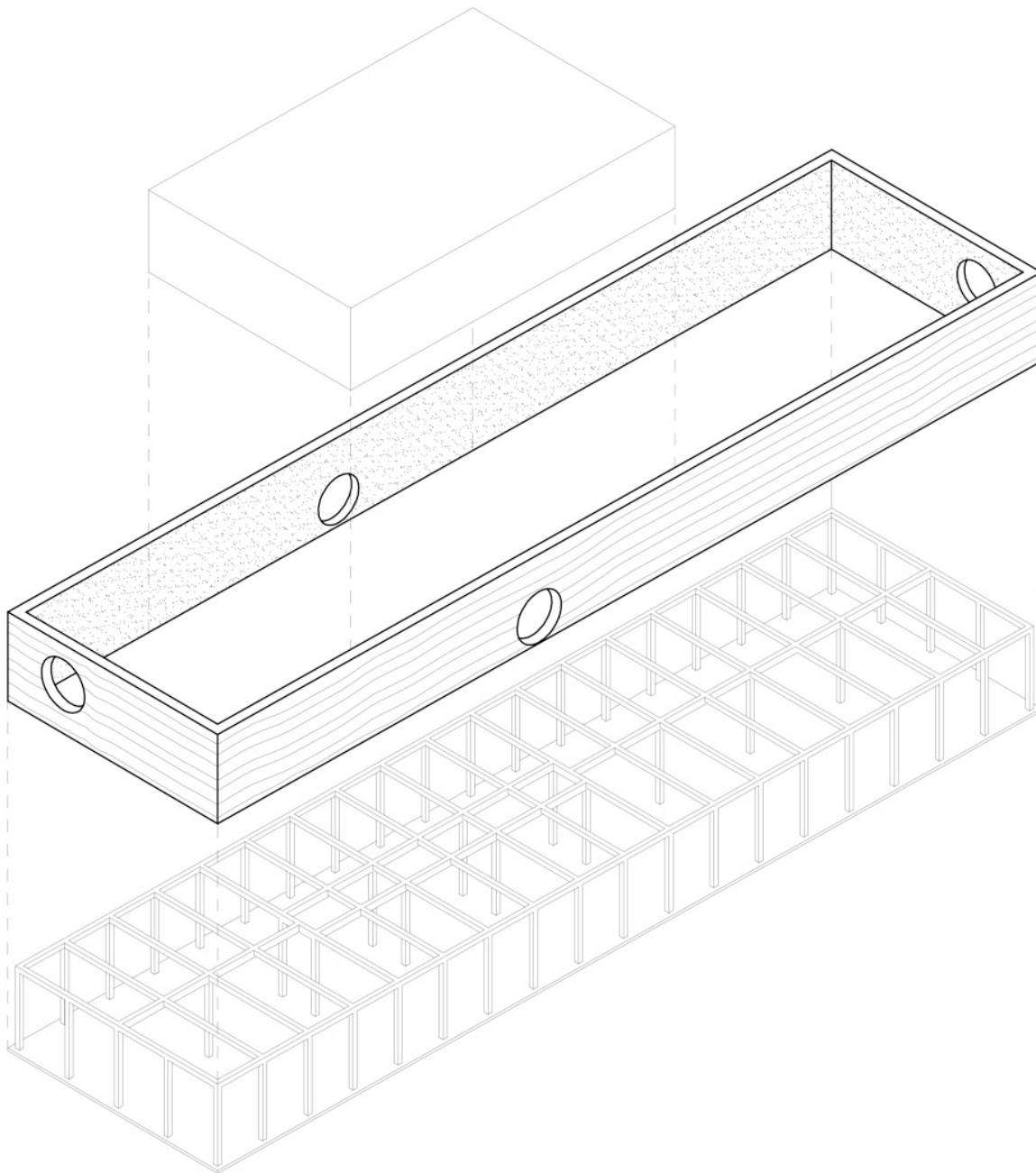


Fig 100. Assonometria del concept di progetto

<https://www.herzogdemeuron.com/projects/369-ricola-krauterzentrum/lightbox/30315/>

Il processo costruttivo adottato da Martin Rauch per Ricola Herb Centre è un processo in cui vede la prefabbricazione off site delle componenti in terra battuta.

La produzione degli elementi in terra e lo stoccaggio sono avvenuti in uno stabilimento separato dal cantiere, realizzato a circa 3 km¹⁴⁰ dal sito di costruzione a Zwingen, per evitare il lungo processo di essiccazione dell'argilla in cantiere¹⁴¹.

I mesi disponibili per l'installazione degli elementi in terra battuta erano solo tra aprile e ottobre, poiché la temperatura non doveva scendere al di sotto del punto di congelamento durante il trasferimento degli elementi. Difatti, i dipendenti di Lehm Ton Erde, ancor prima della costruzione della struttura in cemento armato, hanno iniziato a produrre l'impasto miscelando circa 3000 t¹⁴² di argilla, marna e ghiaia con la pala gommata nello stabilimento di Zwingen.

Le dimensioni dell'edificio richiedevano un processo di costruzione più efficiente rispetto alla costruzione "a mano"¹⁴³ con l'aiuto di costipatori per la compattazione della terra in loco in casseforme e la nuova macchina semi-automatico Roberta, sviluppato dall'azienda Reich in stretta collaborazione con Martin Rauch ha reso possibile il completamento di Ricola herb centre in tempo e nel rispetto del budget¹⁴⁴.

Questo approccio, quindi, ha permesso di limitare il tempo di costruzione a un totale di 15 mesi¹⁴⁵, dove la fase di montaggio dell'intero involucro (costituito da 666 pannelli impilabili) ha richiesto solamente 90 giorni, utilizzando 15 operai e il supporto di una gru, per il sollevamento dei carichi¹⁴⁶.

PRODUZIONE off site DELLE PARETI IN TERRA BATTUTA

- All'interno dello stabilimento, i casseri sono stati posizionati lungo una linea di montaggio a catena lunga 50 m, riducendo il movimento dei pezzi durante il processo di produzione. I blocchi prefabbricati vengono spostati solo dopo l'essiccazione completa.
- I casseri sono stati riempiti con la miscela composta da argilla, marna e materiale scavato sul posto, in strati alti circa 10-12 cm. Ogni strato è stato con il costipatore ad aria

2014. https://www.vogt-la.com/print/ricola_herb_centre

140 Kapfinger O., Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.p119

141 Thomas Wieckhorst, Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen, in "bauhandwerk", ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflehmbau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

142 Thomas Wieckhorst, Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen, in "bauhandwerk", ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflehmbau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

143 AR EDITORS, Centro erboristico Ricola in Svizzera di Herzog e de Meuron con Martin Rauch, in "The Architectural Review"20 febbraio 2020. <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/ricola-herb-centre-in-switzerland-by-herzog-and-de-meuron-with-martin-rauch>

144 Con Roberta in nuove dimensioni di edificio in argilla, in "allerhand!" <https://allerhand-magazin.at/mit-robera-in-neue-lehmbau-dimensionen/?cookie-state-change=1737199446370>

145 Ibidem.

146 Chiara Salvini, Rauch House – Agricultural School – Ricola Herb Centre, Martin Rauch, in "Arketipo", 19 gennaio 2023. <https://www.arketipomagazine.it/rauch-house-agricultural-school-ricola-herb-centre-martin-rauch/>



Immagini di cantiere



Fig. 101. Miscela dell'impasto di terra.
<https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=87>



Fig. 104. Pannelli in terra tagliati nel formato 4,35x1,35,0,45.
<https://www.baunetzwissen.de/>



Fig. 102 produzione di pannelli con Roberta
<https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=87>



Fig. 105 Assemblaggio del sistema portante prefabbricato in calcetsruzzo.
<https://www.peikko.it/reference/ricola-herb-center/>



Fig. 103 Controllo e sistemazione dei blocchi
<https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=87>



Fig. 106 Installazioni delle pareti in terra battuta.
<https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=87>

compressa¹⁴⁷ fino a raggiungere uno spessore finale di circa 8 cm.

- Il processo di versatura e battitura è stato eseguito quasi interamente in modo semi-automatico. Per la prima volta, nel progetto di Ricola herb centre, è stata utilizzata la nuova macchina Roberta che ha semplificato e alleggerito il lavoro manuale dei dipendenti durante le fasi di riempimento compattazione e pressatura dell'argilla¹⁴⁸;
- per verificare che non vi siano state parti battute male, gli operatori premono nuovamente sulla terra già battuta dalla macchina¹⁴⁹.
- Elementi in legno verticale sono stati integrati nelle pareti a intervalli regolari di 336 cm, fungendo da punti di rottura predeterminati. In questo modo, la parete lunga 50 m è stata suddivisa in singoli pannelli prefabbricati, ciascuno del peso di circa 4,6 tonnellate. Le dimensioni dei pannelli sono state progettate in base alla capacità di sollevamento delle gru presenti nel capannone.
- Per migliorare il collegamento tra i pannelli durante l'installazione in cantiere, sono state create scanalature verticali e orizzontali sui lati anteriori e sulle superfici superiori dei pannelli, martellate manualmente con uno scalpello.
- Il processo è stato ripetuto fino a raggiungere il numero richiesto di blocchi prefabbricati, successivamente trasportati in cantiere per l'installazione¹⁵⁰.

POSA IN OPERA DI PANNELLI A PARETE IN CANTIERE

I blocchi prefabbricati in terra battuta sono stati trasportati in cantiere con un camion e posizionati uno sopra l'altro con la gru.

Nel giunto portante orizzontale dei pannelli delle pareti sono stati posizionati due barre d'armatura¹⁵¹. Queste servono a trasferire la forza dei carichi orizzontali attraverso i punti di ancoraggio alle colonne di cemento armato. Le forze di compressione della terra battuta vengono assorbite dalle pareti stesse. Le giunture sia quelle portanti che quelli verticali nei lati anteriori sono stati coperti con malta trasskalk¹⁵², compattate e levigate con tavola e mazzuolo.

147 Thomas Wieckhorst, *Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen*, in "bauhandwerk", ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflembau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

148 Rincalzatrice per pareti in argilla per progetti su larga scala a Bordeaux, in "REISCH MASCHINENBAU", <https://www.reisch.at/de/unternehmen/news/beschicker-bordeaux.php>

149 Aurelio Greco, *Il rammed earth o pisé*, in "Un passaggio per Biotopia". https://www.unpassaggioperbiotopia.org/materiali/principali-tecniche-di-posa-con-la-terra/rammed-earth-o-pise/?-doing_wp_cron=1751557141.4644930362701416015625

150 Aurelio Greco, *Il rammed earth o pisé*, in "Un passaggio per Biotopia". <https://www.unpassaggioperbiotopia.org/materiali/principali-tecniche-di-posa-con-la-terra/rammed-earth-o-pise/>

151 Thomas Wieckhorst, *Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen*, in "bauhandwerk", ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflembau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

152 **Trasskalk** è una miscela di calce idrata o calce e trass macinato. La roccia trass si è formata sulla crosta terrestre da eruzioni vulcaniche o impatti di meteoriti. Insieme alla calce e all'acqua, il calcare trass forma un legante ecologico naturale. *Trasskalk*, in "LEHMAG". <https://lehmag.ch/materialien/trasskalk/>



Fig. 107 Immagine di cantiere.

<https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/objekte/gewerbe-industrie/ricola-kraeuterzentrum-in-laufen-4297417>

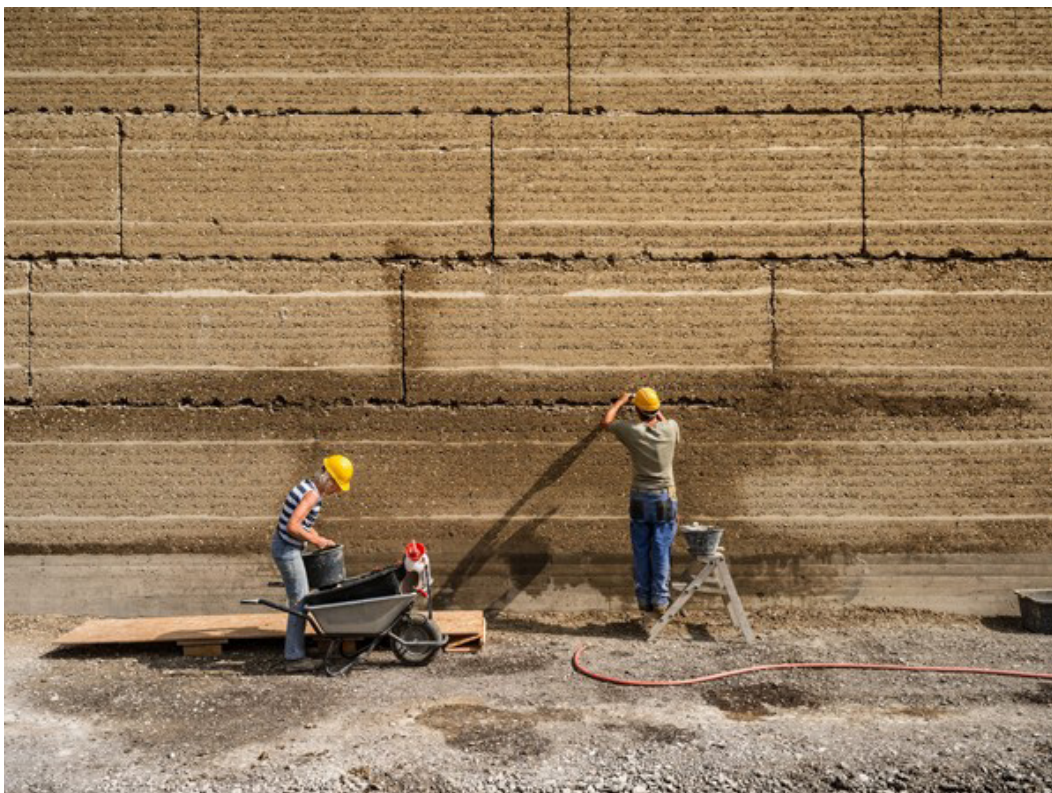


Fig. 108 Applicazione di terra umida per sigillare le giunzioni tra i blocchi di terra compattata. Fotografia di: Markus Buhler. Fonte: <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/ricola-herb-centre-in-switzerland-by-herzog-and-de-meuron-with-martin-rauch>

SISTEMI COSTRUTTIVI:

Struttura portante

L'azienda svizzera è un edificio ibrido costituito da elementi prefabbricati in terra e calcestruzzo. In questa costruzione, ogni materiale viene utilizzato in base ai suoi punti di forza: la costruzione prefabbricata della struttura portante in calcestruzzo assolve la funzione di assorbire le forze di aspirazione del vento e impedisce il ribaltamento delle pareti esterne in terra battuta. Ognuna delle 70 colonne è stata progettata con un calcestruzzo auto compattante e prodotta presso la fabbrica Peikko. Il sistema di collegamenti bullonati consente un'installazione notevolmente semplice e rapida delle colonne; infatti, nel caso di Ricola Herb Centre, sono state montate fino a 17 colonne al giorno, compresa la stuccatura¹⁵³.

Sistema di fondazione:

Il sistema di fondazioni del nuovo stabilimento di Ricola herb centre è realizzato come una lastra di calcestruzzo leggero spesso circa 62 cm e protegge la parete dagli schizzi di pioggia.

Pareti perimetrali

I muri perimetrali di Ricola Herb centre sono costituiti da pannelli autoportanti prefabbricati in terra battuta di spessore 45 cm “questo spessore delle pareti si è dimostrato valido in termini di proprietà strutturali, fisiche costruttive, formali ed esecutive”, afferma Rauch¹⁵⁴. Per rivestire l'intero edificio sono stati necessari l'utilizzo di 666 pannelli che non sopportano carichi aggiuntivi ma svolgono il ruolo di rivestimento¹⁵⁵ per la struttura portante in cemento armato a telaio e travi ed è fissata tramite canali di ancoraggio.

Sistema di Copertura:

In Ricola Herb Centre la facciata in terra è completamente separata dal resto della costruzione, sviluppando un sistema autonomo, in cui la terra è esclusa dalle questioni relative alla copertura. Il tetto, infatti, funziona in modo indipendente ed è composto da lastre di calcestruzzo gettate in opera, sostenute da un telaio in cemento armato¹⁵⁶.

Il bordo del tetto è costituito da lamiera ondulata fissata a una copertina in calcestruzzo.

Controllo erosione

Come in casa Raich, Ricola Herb Centre non presenta una copertura aggettante in grado di proteggere le facciate dagli agenti atmosferici, la sporgenza del tetto è di soli 50cm, che è minima rispetto all'altezza dell'edificio¹⁵⁷.

153 Progetto del mese: Ricola Herb Center, Laufen, Svizzera, in “Peikko”, 7 aprile 2021. <https://www.peikko.com/news/project-of-the-month-ricola-herb-center-laufen-switzerland/>

154 Thomas Wieckhorst, *Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen*, in “bauhandwerk”, ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflehmbau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

155 Kapfinger O., *Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth*, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.p 83

156 Ibidem.

157 Thomas Wieckhorst, *Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen*, in “bauhandwerk”, ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflehmbau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

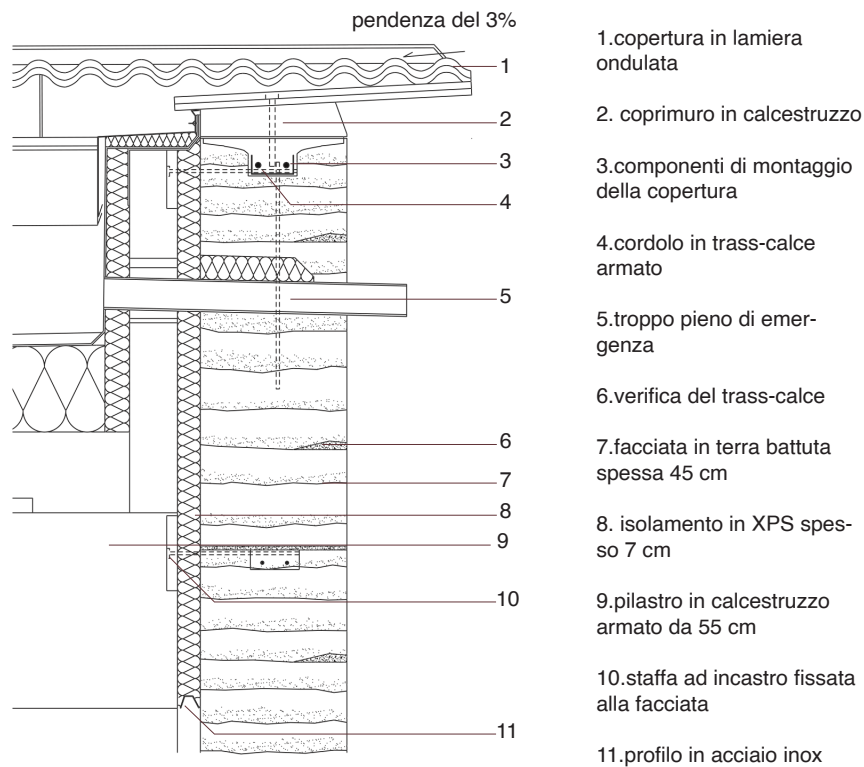


Fig 109. Dettaglio del sistema copertura e pareti perimetrali in terra.
<https://www.architectural-review.com/buildings/earth/ricola-herb-centre-in-switzerland-by-herzog-and-de-meuron-with-martin-rauch>

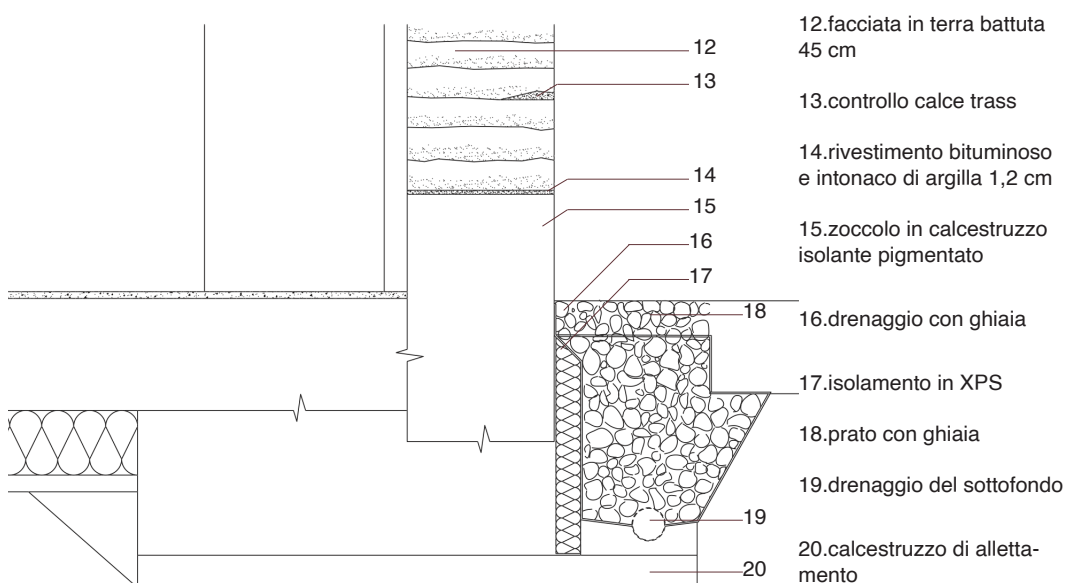


Fig. 110 Dettaglio del sistema fondazion.
<https://www.architectural-review.com/buildings/earth/ricola-herb-centre-in-switzerland-by-herzog-and-de-meuron-with-martin-rauch>

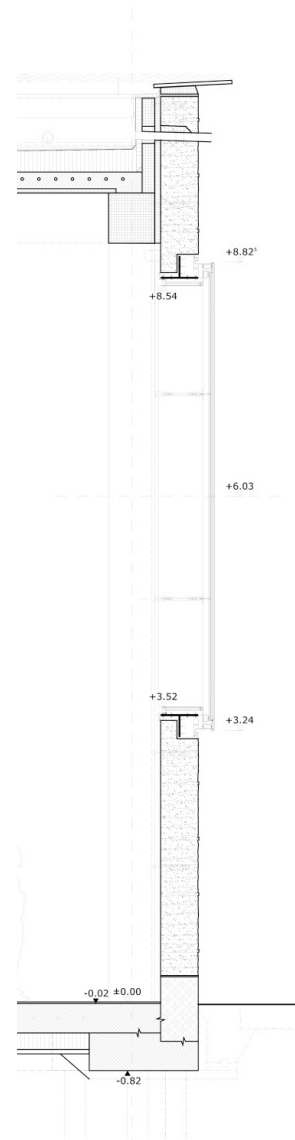


Fig. 111 Finestra circolare con telaio in acciaio e alette laterali, incorniciata da blocchi in argilla prefabbricati e sostenuta sul retro da uno scheletro in cemento. Fonte: <https://www.espazium.ch/de/aktuelles/pre-porter>

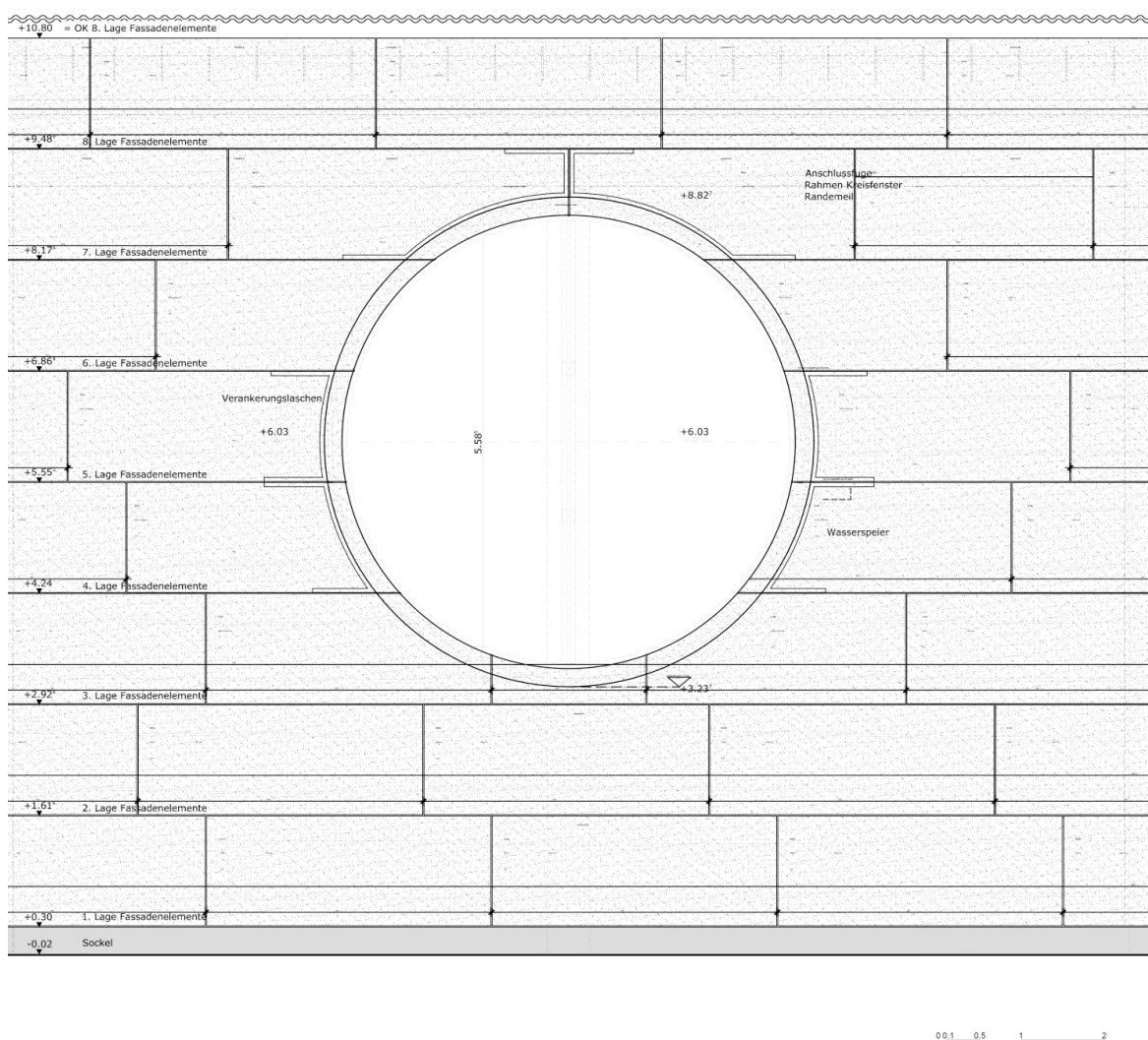


Fig. 112 Sezione e prospetto di dettaglio della parete perimetrale in terra battuta. <https://www.herzogdemeuron.com/project-s/369-ricola-krauterzentrum/lightbox/30327/>

La strategia adottata dall'architetto per proteggere le pareti dalla corrosione causata da vento e pioggia consiste nel compattare ogni 60 cm circa, uno strato di malta di trasskalk alto 2,5 a 10-15 cm di profondità negli strati di argilla larghi 45 cm¹⁵⁸.

Dopo un certo periodo, le strisce di malta trasskalk sporgono appena di 1 o 2 mm dalla superficie della facciata, ma questo è sufficiente per interrompono il flusso della pioggia battente, riducendo la velocità dell'acqua sulla superficie. Questo contribuisce a un'erosione più lenta e prevedibile.

Inoltre, le superfici in argilla hanno la capacità di asciugarsi rapidamente una volta terminata la pioggia, impedendo così la formazione di alghe o funghi sulla facciata.

Aperture:

L'utilizzo di elementi prefabbricati permette di integrare geometrie completamente diverse nelle facciate¹⁵⁹. Difatti, Ricola Herb Centre presenta un'ampia finestra circolare che illumina gli ambienti interni.

Il Ricola Herb Centre presenta un approccio radicale per incorporare le aperture nella terra battuta. La forma precisa della finestra rotonda, con un diametro di 5,8 metri, è sia un elemento architettonico che una caratteristica strutturale: l'arco distribuisce le forze in modo ottimale intorno all'apertura (non è necessario il rinforzo dell'architrave) e la forma circolare è composta da due semicirconferenze orizzontalmente riflettenti. Le superfici delle finestre sporgono di circa 20 cm e l'acqua viene drenata attraverso un gocciolatoio, evitando così di scorrere lungo le pareti di terra battuta sottostante.

SOLUZIONI SOSTENIBILI e EFFICIENZA ENERGETICA

Ciclo di vita /Demolizioni:

Il Ricola Herb Centre, come visto, è un esempio di costruzione ibrida che combina elementi prefabbricati in terra battuta con una struttura portante in cemento armato. Questo approccio presenta numerosi vantaggi dal punto di vista dell'efficienza energetica e della sostenibilità ambientale, grazie all'utilizzo della terra battuta come materiale principale per le facciate.

Dal punto di vista del ciclo di vita, i pannelli prefabbricati in terra battuta offrono un'elevata circolarità. Essendo realizzati senza l'aggiunta di additivi chimici o sostanze sintetiche, possono essere facilmente riutilizzati in nuovi progetti o restituiti alla terra senza generare rifiuti o impatti ambientali negativi. Questo rende la componente in terra battuta una soluzione ecologica e sostenibile per l'edilizia.

Tuttavia, le parti in cemento, come la struttura portante e il sistema di fondazione, rappresentano un limite significativo alla piena circolarità dell'edificio. A differenza della terra battuta, il cemento non è facilmente riciclabile e il suo smaltimento comporta un notevole impatto ambientale. La presenza del cemento, pur garantendo stabilità strutturale e resistenza, riduce la sostenibilità complessiva del progetto.

158 Thomas Wieckhorst, *Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen*, in "bauhandwerk", ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflembau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html

159 Kapfinger O., *Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth*, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.p 99



Comfort termico:

Grazie alla terra battuta, Ricola Herb Centre mantiene il giusto livello di temperatura e umidità all'interno dell'edificio, garantendo così la massima qualità dei prodotti a base di erbe. Si tratta di una soluzione semplice e naturale che elimina la necessità di apparecchiature per il controllo dell'umidità e della temperatura.

La massa termica e la porosità del materiale contribuiscono molto a migliorare il comportamento energetico dell'edificio: funzionando come assorbitore e ritardante della trasmissione del calore, la parete impedisce sbalzi improvvisi della temperatura interna e regola l'umidità dell'aria, catturando il calore in inverno e rilasciandolo progressivamente durante l'estate.

Riscaldamento e acqua calda:

Solo l'area visitatori è riscaldata con il calore di scarto della produzione di caramelle della fabbrica limitrofa, il resto dell'edificio non è riscaldato grazie alla facciata in argilla che ha un effetto equilibrante su temperatura e umidità¹⁶⁰.

Energia e Sostenibilità

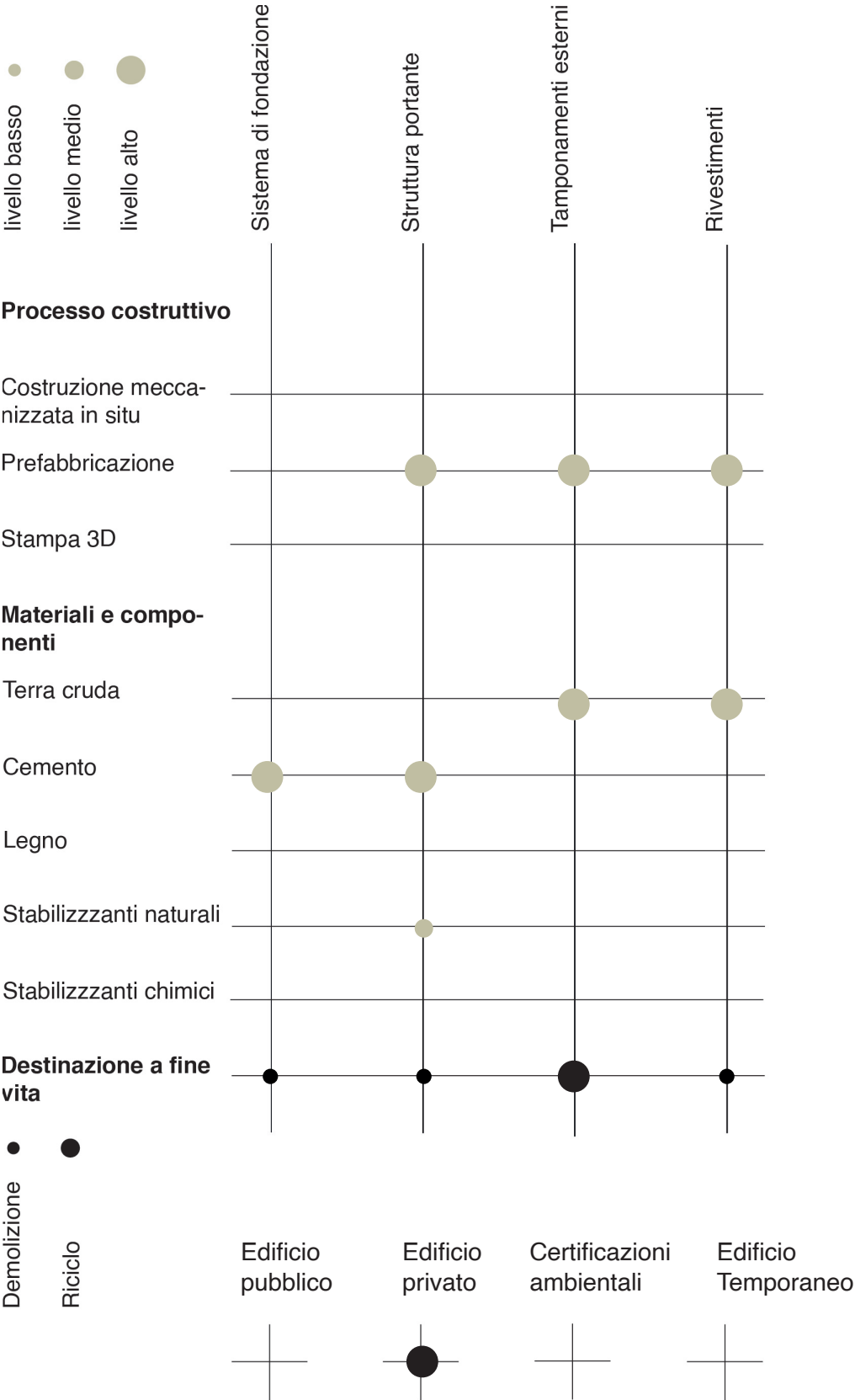
Il nuovo edificio produttivo è caratterizzato da un'elevata efficienza energetica e soddisfa le più recenti linee guida sulla bioedilizia¹⁶¹. L'energia e la sostenibilità non sono semplicemente trattate come ausiliari tecnici; sono integrati nell'architettura e nelle caratteristiche essenziali del progetto nel suo complesso.

La terra, come materiale che regola l'umidità, ha un effetto positivo e sostenibile sull'uso dell'energia e sul controllo generale del clima. Anche i moduli fotovoltaici sul tetto e l'utilizzo del calore di scarto del vicino centro di produzione contribuiscono a migliorare l'equilibrio ecologico dell'azienda.

160 Jenny Keller, Neue Zürcher Zeitung, *Un edificio in argilla per Laufen*, in "NZZ", 15 febbraio 2013. <https://www.nzz.ch/ein-lehmbau-fuer-laufen-ld.844621>

161 *Das neue Ricola Kräuterzentrum – Nachhaltigkeit und Spitzenarchitektur*, in "Ricola". <https://isofloc.com/assets/Referenzen/Gewerbe-und-Industriebauten/187-PDF-2.pdf>

Scheda riassuntiva



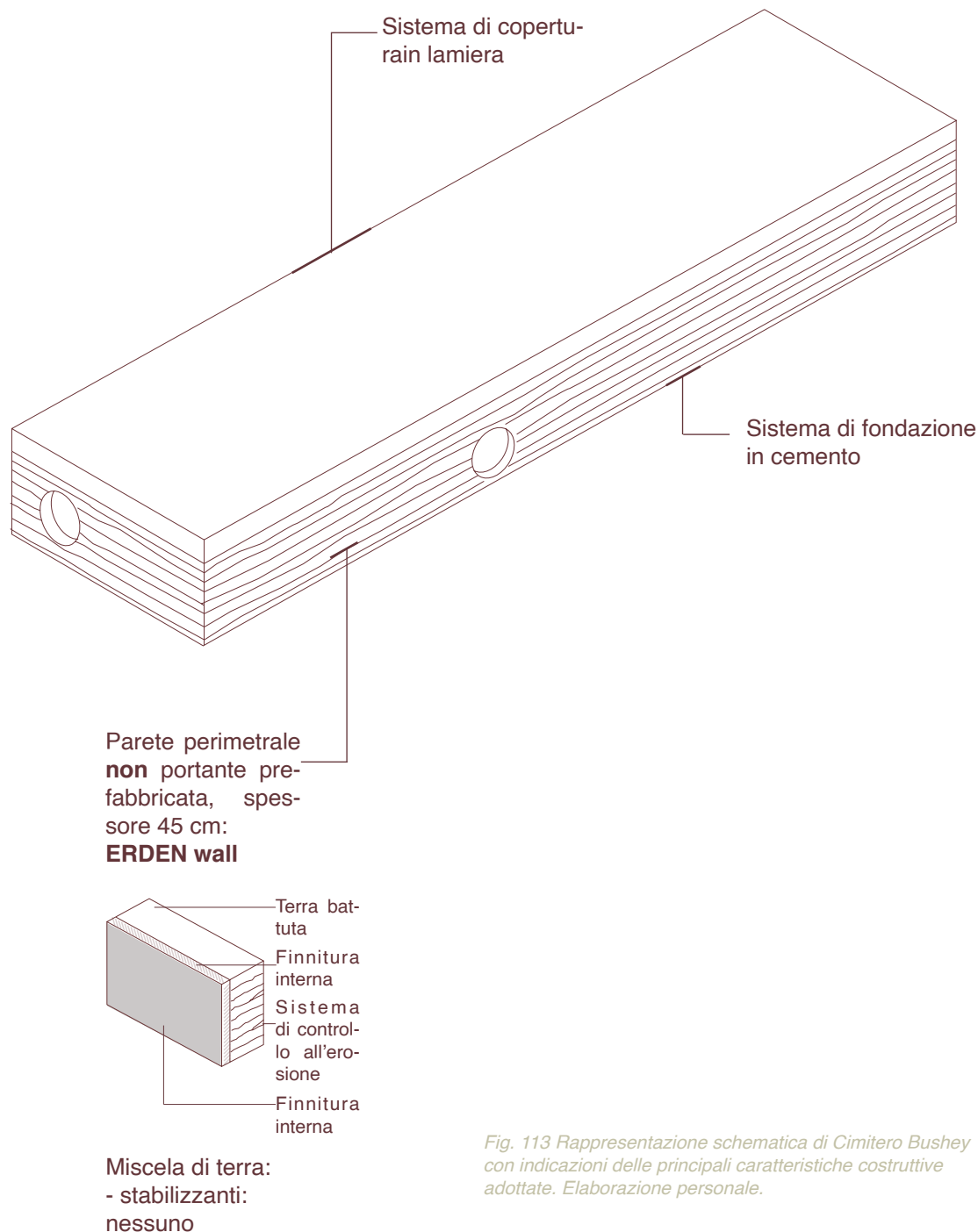


Fig. 113 Rappresentazione schematica di Cimitero Bushey con indicazioni delle principali caratteristiche costruttive adottate. Elaborazione personale.

Ricola Herb Centre è una costruzione prefabbricata in terra cruda, realizzata interamente con un approccio off-site. Sia i blocchi di terra cruda per i tamponamenti sia la struttura portante in calcestruzzo sono stati prefabbricati. Come negli altri casi analizzati, le fondazioni sono in cemento, mentre la miscela di terra utilizzata per la produzione dei blocchi presenta stabilizzanti naturali. A differenza degli elementi in cemento e calcestruzzo, che limitano la circolarità del progetto, i pannelli prefabbricati in terra cruda possono essere reintegrati nel suolo senza generare rifiuti né causare impatti ambientali negativi.

ALNATURE CAMPUS, 2017, (Germania)

Tipologia costruttiva:

Edificio per uffici

Superficie:

13.500 m2 (superficie lorda)

Luogo:

Darmstadt, Germania

Anno di ultimazione:

2019

N piani:

3

Certificati:

Certificato Platino DGNB

Premi:

Best Architects 20 (2019) – Categoria edifici

Costo:

-

Architetto:

Martin Haas - STUIDIO 2050

Impresa Costruttrice:

Lehm Ton Erde Schweiz GmbH

Costruzione:

ERDEN wall





3.2 Processo di costruzione costruzione off site



Fig. 114 Alnatura Campus. Fotografia di: Roland Halbe
Fonte: <https://www.kessel.fr/produits/references/details/Campus%20Alnatura>

II POGETTO / descrizione:

Il progetto “Alnatura Campus” nasce dalla riconversione di una ex caserma a sud-ovest di Darmstadt, trasformata in un campus aziendale con funzioni multiple. L’edificio principale ospita circa 500 postazioni di lavoro ed è affiancato da un ristorante vegetariano, un supermercato biologico, un asilo pubblico e un orto didattico. Il progetto, sviluppato secondo un approccio olistico e sostenibile, si configura come il più grande edificio per uffici in Europa realizzato con facciate in terra cruda prefabbricata¹⁶².

Il progettista, Haascookzemmrich STUDIO2050, fondato da Martin Haas, David Cook e Stephan Zemmrich, è attivo a livello internazionale nei settori della progettazione urbana e architettonica. Lo studio sviluppa soluzioni orientate alla sostenibilità ambientale e al benessere delle persone, con un approccio attento alla qualità dello spazio e all’impatto ecologico degli interventi¹⁶³.

MATERIA PRIMA E FILIERA DI PROVENIENZA:

Gli elementi in terra battuta sono stati realizzati con materiale proveniente in parte dal cantiere del tunnel ferroviario “Stoccarda 21”¹⁶⁴, promuovendo il riuso dei materiali da scavo.

I blocchi prefabbricati in terra cruda misurano 3,5 × 1 m e sono stati impiegati per costruire 16 segmenti murari alti 12 m ciascuno. Il nucleo dei blocchi è composto da ghiaia di vetro espanso riciclato, che funge da isolante. I blocchi sono stati prodotti in uno stabilimento vicino al cantiere sempre a Darmstadt, riducendo l’impatto ambientale legato al trasporto.

PROCESSO COSTRUTTIVO / costruzione prefabbricata off site

Il processo costruttivo degli elementi in terra battuta impiegati nell’Alnatura Campus si è svolto in una logica off-site, all’interno di un’ex sala veicoli dell’esercito americano a Darmstadt, convertita per la produzione dei blocchi. Questo approccio industrializzato ha permesso di realizzare con precisione e controllo ambientale elementi prefabbricati di grandi dimensioni, ciascuno della misura di 3,5 metri per 1 metro¹⁶⁵.

Per la produzione dei blocchi, i tecnici della ditta Erden, filiale di Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, hanno utilizzato una cassaforma lineare di 35 metri realizzata dall’azienda Doka. Il processo prevede l’utilizzo di due alimentatori mobili che scorrono sopra la cassaforma depositando contemporaneamente tre strati di materiale: la miscela di argilla viene collocata all’esterno, mentre il cuore dei blocchi è costituito da ghiaia di vetro espanso¹⁶⁶, un materiale riciclato che funge da isolante termico.

Questo riempimento multistrato viene immediatamente compattato dagli operatori, consolidando la struttura del blocco.

¹⁶² Il campus Alnatura a Darmstadt, in “Alnatura”, <https://www.alnatura.de/de-de/ueber-uns/alnatura-campus/>

¹⁶³ Studio, in “hass cook zemmrich – Studio 2050”, <https://www.haascookzemmrich.com/en/studio/>

¹⁶⁴ Alnatura Campus Darmstadt / Germania. In “hass cook zemmrich – Studio 2050”

¹⁶⁵ Ibidem.

¹⁶⁶ Thomas Wieckhorst, L’Alnatura Campus di Darmstadt con la più grande facciata in terra

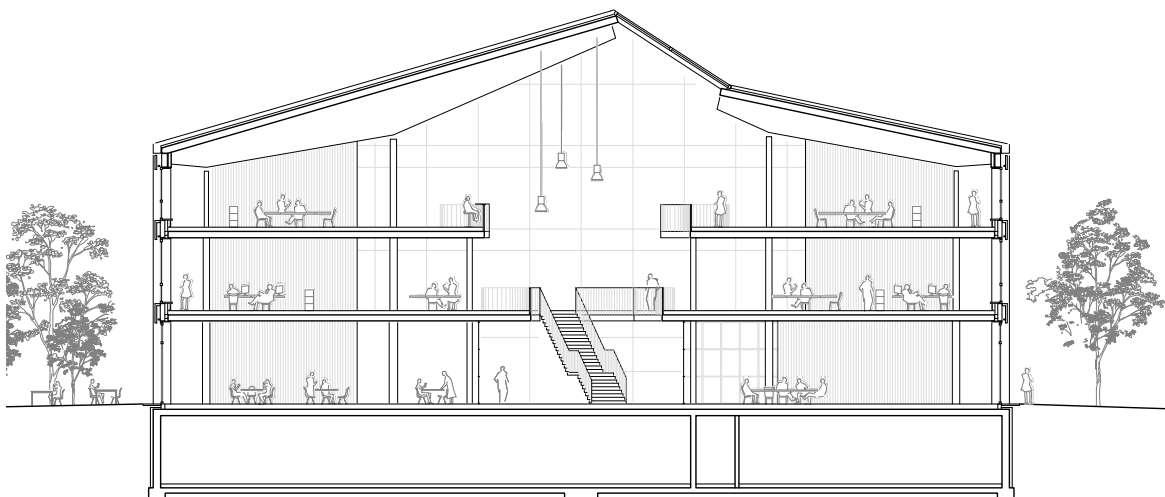
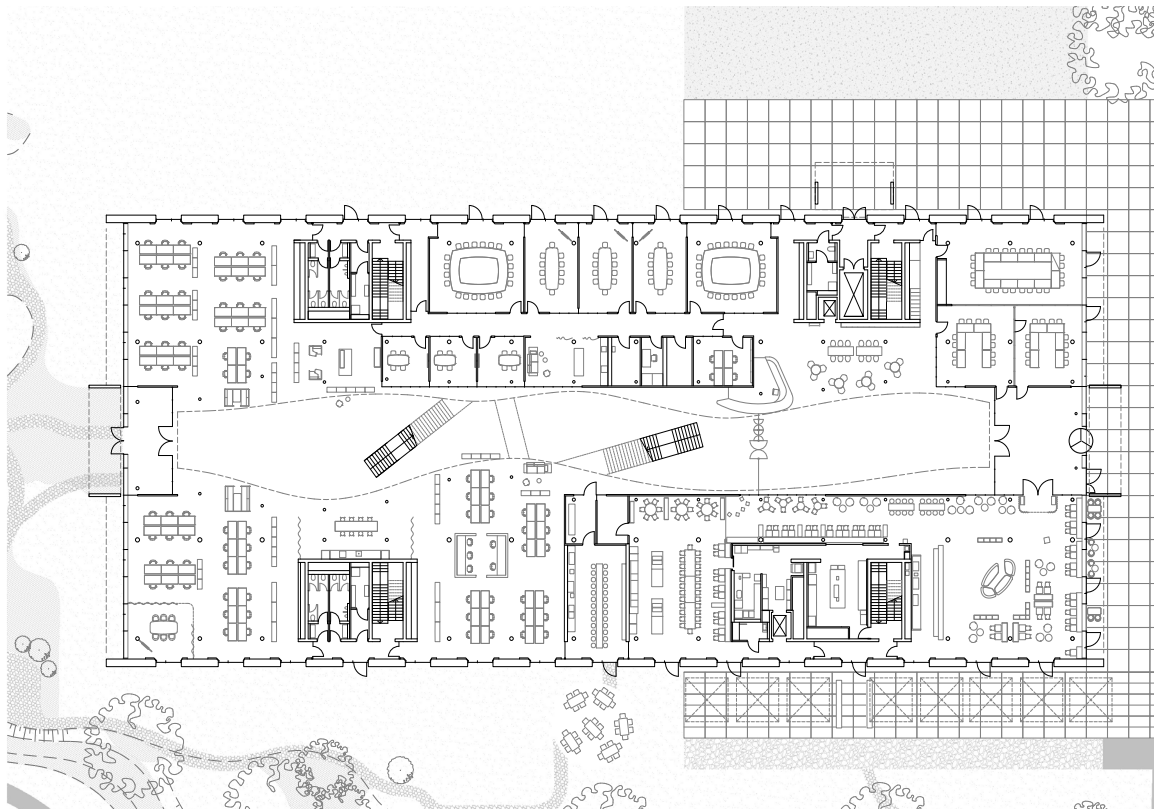


Fig. 115 Pianta piano tipo e sezione trasversale - rappresentazioni fuori scala.
Fonte: <https://www.bestworkspaces.com/workspaces/alnature-campus/>

Un aspetto fondamentale del sistema è la protezione delle superfici esterne: durante il processo, viene applicata lungo il bordo della cassaforma una malta trasskalk (una miscela naturale a base di calce trass), che svolge la funzione di barriera antierosione.

La particolarità del sistema sta nel fatto che questa protezione agisce nel tempo: la pioggia degrada lentamente lo strato superficiale di argilla, esponendo progressivamente la malta trass, che inizia così a frenare l'acqua piovana, riducendone l'impatto erosivo. Inoltre, ogni 30-60 cm verticali vengono inserite barriere orizzontali di argilla e calce trass¹⁶⁷, analoghe alle tecniche delle opere fluviali, per dissipare l'energia cinetica dell'acqua e minimizzare il degrado superficiale della terra battuta.

Una volta realizzati, i blocchi venivano personalizzati manualmente: con martelli a scalpello, venivano incise scanalature verticali e orizzontali non per fini strutturali, ma per consentire l'alloggiamento di infissi e tubazioni¹⁶⁸. Gli elementi così sagomati sono stati poi posati in opera in cantiere, lungo le facciate nord e sud dell'edificio, per formare 16 segmenti di muro alti 12 metri ciascuno.

La posa in opera è avvenuta mediante l'impiego di gru¹⁶⁹, che hanno depositato i blocchi su plinti in calcestruzzo alleggerito, progettati per evitare umidità di risalita e ponti termici. I blocchi sono stati giuntati tra loro con malta di argilla, mantenendo così la coerenza materica e prestazionale con l'intero sistema murario.

Sistemi costruttivi:

Pareti perimetrali:

Le pareti perimetrali dell'edificio Alnatura Campus sono realizzate con elementi prefabbricati in terra battuta di dimensioni pari a 12 m di altezza, 3,5 m di larghezza e 69 cm di spessore, posizionati lungo i lati lunghi da 94 metri dell'edificio. Le superfici esterne sono lasciate non trattate, consentendo alla pioggia di dilavare gradualmente lo strato superficiale di argilla. Tale processo espone sali naturali interni che formano una protezione passiva contro l'erosione. Al contrario, le superfici interne sono trattate con leganti naturali per migliorarne la durabilità.

Un aspetto tecnico rilevante riguarda l'integrazione di un sistema di riscaldamento a parete geotermico¹⁷⁰, posizionato all'interno delle pareti durante la fase di prefabbricazione. La simulazione energetica ha evidenziato la necessità di attivare termicamente le pareti per compensare la dispersione invernale, data le elevate altezze interne dell'edificio.

battuta d'Europa, in "bauhandwerk", 1 febbraio 2021. <https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw-alnatura-campus-in-darmstadt-mit-groesster-frei-bewitterter-stampflehmfassade-3605079.html>

167 Alnatura Campus Darmstadt / Germania. In "hass cook zemmrich – Studio 2050", <https://www.haascookzemmrich.com/en/projekte/alnatura-campus-en/>

168 Thomas Wieckhorst, L'Alnatura Campus di Darmstadt con la più grande facciata in terra battuta d'Europa, in "bauhandwerk", 1 febbraio 2021. <https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw-alnatura-campus-in-darmstadt-mit-groesster-frei-bewitterter-stampflehmfassade-3605079.html>

169 Thomas Wieckhorst, L'Alnatura Campus di Darmstadt con la più grande facciata in terra battuta d'Europa, in "bauhandwerk", 1 febbraio 2021. <https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw-alnatura-campus-in-darmstadt-mit-groesster-frei-bewitterter-stampflehmfassade-3605079.html>

170 Thomas Wieckhorst, L'Alnatura Campus di Darmstadt con la più grande facciata in terra



Immagini di cantiere



Fig. 116 Immagine di produzione dei blocchi di pareti con Roberta
Fonte: <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=97>



Fig. 118 Fotografia in cui vengono trasportati blocchi per il montaggio in cantiere.
Fonte: <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=97>



Fig. 117 Blocchi prefabbricati (pareti Erden) con sistema di riscaldamento integrato
Fonte: <https://www.ubm-development.com/magazin/en/a-love-of-loam/>



Fig. 119 Montaggio dei blocchi prefabbricati
Fonte: https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Groesste_Lehmfassade_Europas-3321098.html



Fig. 120 Immagine di cantiere in corso.
Fonte: <https://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?plD=97>

I blocchi includono un nucleo isolante in ghiaia di vetro espanso riciclato (spessore 17 cm), inserito tra due strati di terra battuta. Questa soluzione migliora le prestazioni termiche senza compromettere le proprietà igroscopiche del materiale. Le pareti contribuiscono inoltre alla regolazione dell'umidità, al comfort acustico interno e non richiedono manutenzione specifica grazie alla resistenza della superficie agli agenti biologici e atmosferici¹⁷¹.

Sistema di fondazione:

Le fondazioni dell'edificio sono costituite da elementi prefabbricati in calcestruzzo alleggerito LC12/13, alti circa 50 cm, realizzati con sabbia chiara dalla ditta Schneider Beton-fertigteilewerk GmbH. Tali elementi, posizionati alla base di ciascun segmento murario, fungono da plinti su cui vengono collocati i blocchi in terra battuta¹⁷².

A completamento della struttura, sono stati realizzati in opera ancoraggi ad anello dello stesso tipo di calcestruzzo (LC12/13), con spessore di 14 cm¹⁷³. Questi sono collegati allo scheletro portante mediante armature e staffe in acciaio, assicurando l'integrazione tra le pareti in terra e la struttura dell'edificio.

Oltre alla funzione strutturale, il calcestruzzo alleggerito utilizzato (Liapor) contribuisce a limitare la formazione di ponti termici, grazie alle sue proprietà isolanti, migliorando così l'efficienza energetica dell'involucro edilizio.

Sistema di copertura:

La copertura dell'edificio è costituita da una struttura a due falde in legno, progettata per integrare sia funzioni tecniche che passive. Il tetto ospita pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile e incorpora lucernari rivolti a nord, studiati per garantire un'illuminazione naturale diffusa e costante all'interno degli ambienti, riducendo il fabbisogno di luce artificiale durante il giorno¹⁷⁴.

SOLUZIONI SOSTENIBILI e EFFICIENZA ENERGETICA

Ciclo di vita e approccio alla demolizione

Il progetto Alnatura Campus adotta un approccio olistico alla sostenibilità, che considera l'intero ciclo di vita dell'edificio, includendo anche le fasi di smontaggio e demolizione. Fin dalle prime fasi progettuali sono stati analizzati i flussi di materia ed energia necessari per la costruzione, l'uso e il fine vita dell'opera. In questo contesto, è stata effettuata una valutazione dell'energia grigia contenuta nei materiali, includendo produzione, trasporto, posa in opera, manutenzione e rimozione.

L'intero processo è stato supportato dalla Fondazione federale tedesca per l'ambiente (DBU) e sviluppato in collaborazione con l'Università tecnica di Monaco di Baviera, allo scopo di definire parametri replicabili per edifici futuri a neutralità di risorse¹⁷⁵.

battuta d'Europa, in "bauhandwerk", 1 febbraio 2021. <https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw-alnatura-campus-in-darmstadt-mit-groesster-frei-bewitterter-stampflehmfassade-3605079.html>

171 Alnatura Campus Darmstadt / Germania, in "hass cook zemmrch – Studio 2050" <https://www.haascookzemmrch.com/en/projekte/alnatura-campus-en/>

172 Thomas Wieckhorst, *L'Alnatura Campus di Darmstadt con la più grande facciata in terra battuta d'Europa*, in "bauhandwerk", 1 febbraio 2021. <https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw-alnatura-campus-in-darmstadt-mit-groesster-frei-bewitterter-stampflehmfassade-3605079.html>

173 Ibidem.

174 Alnatura Campus Darmstadt / Germania, in "hass cook zemmrch – Studio 2050" . <https://www.haascookzemmrch.com/en/projekte/alnatura-campus-en/>

175 Alnatura Campus Darmstadt / Germania, in "hass cook zemmrch – Studio 2050", <https://www.haascookzemmrch.com/en/projekte/alnatura-campus-en/>

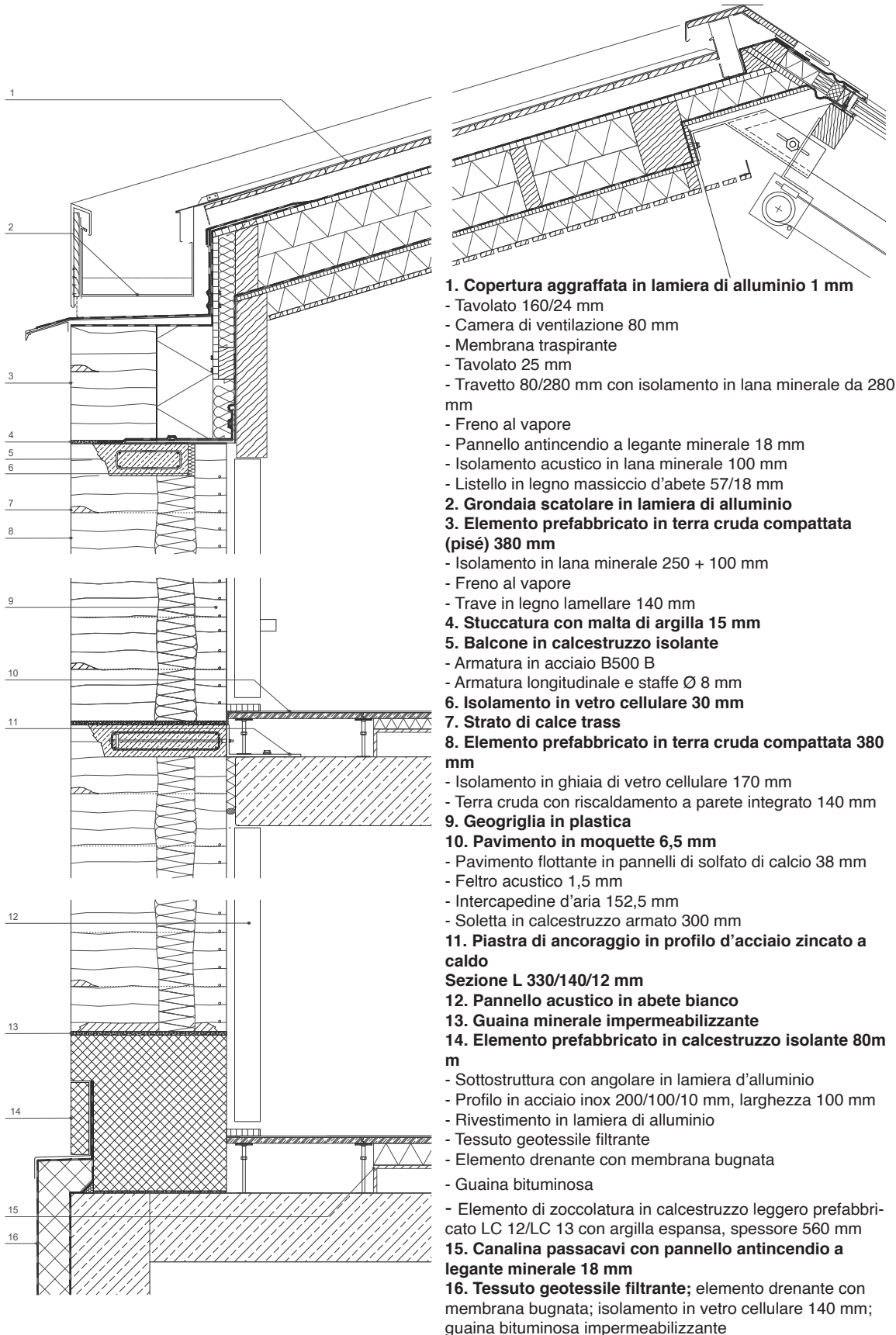


Fig. 121 Sezione di dettaglio terra - cielo. Rappresentazione fuori scala.

Fonte: <https://www.heinze.de/architekturprojekt/alnature-arbeit>

Ventilazione e raffrescamento naturali

Uno degli obiettivi principali del progetto è stato ridurre al minimo la dipendenza da sistemi HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) convenzionali, favorendo soluzioni passive per la ventilazione e il raffrescamento.

L'aria esterna viene captata da due torri di aspirazione e convogliata in un canale sotterraneo, che la precondiziona termicamente prima dell'immissione nei locali. L'impianto è dotato di bocchette di mandata, sensori di CO₂ e aperture regolabili nel tetto dell'atrio centrale. Ventole di supporto sono attivabili solo in caso di necessità.

In estate, il sistema sfrutta la massa termica dell'edificio per raffrescare gli ambienti tramite circolazione notturna dell'aria, mentre in inverno si minimizzano le perdite di calore. Le pareti in terra battuta e i solai in cemento agiscono da elementi di accumulo, mantenendo una temperatura interna stabile anche senza condizionamento meccanico¹⁷⁶.

Illuminazione naturale e controllo solare

L'edificio è progettato per massimizzare l'apporto di luce naturale. Le facciate est e ovest sono interamente vetrate, mentre lucernari orientati a nord e un atrio centrale favoriscono una distribuzione uniforme della luce durante il giorno. Le finestre in cotto sono dotate di sistemi di ombreggiamento esterno, e l'illuminazione artificiale è controllata da sensori in base alla presenza e alla luce diurna.

La distribuzione interna degli ambienti è stata pianificata in funzione del percorso solare, per garantire comfort visivo ed efficienza energetica su tutto l'arco della giornata¹⁷⁷.

Geotermia e riscaldamento/raffrescamento a parete

Il sistema impiantistico utilizza sonde geotermiche verticali per fornire calore e raffrescamento in modo sostenibile. L'energia termica viene trasferita attraverso un sistema di tubazioni integrato nelle pareti in terra battuta, che funziona sia in modalità di riscaldamento radiativo invernale sia di raffrescamento estivo diretto.

Questo sistema è stato inserito all'interno dei blocchi durante la fase di prefabbricazione e rappresenta una delle prime applicazioni al mondo di attivazione termica su pareti in terra cruda non trattata. La combinazione tra inerzia termica, isolamento in vetro espanso e riscaldamento geotermico contribuisce al mantenimento di condizioni di comfort con consumi energetici molto contenuti.

www.haascookzemmrch.com/en/projekte/alnatura-campus-en/

176 *Alnatura Campus Darmstadt / Germania*, in "hass cook zemmrch – Studio 2050", <https://www.haascookzemmrch.com/en/projekte/alnatura-campus-en/>

177 Ibidem.



Energia rinnovabile e principi di semplicità tecnica

Sul tetto dell'edificio è installato un impianto fotovoltaico, che contribuisce all'autosufficienza elettrica. L'intero sistema è progettato secondo il principio della "semplicità tecnica"¹⁷⁸, volto a ridurre l'impiantistica complessa e privilegiando componenti naturali o riciclabili.

Materiali come la terra cruda, la ghiaia di vetro espanso e la struttura lignea del tetto sono stati scelti per il loro basso impatto ambientale e per la possibilità di essere reimpiegati o smaltiti senza contaminazione. Il risultato è un edificio efficiente dal punto di vista energetico, robusto nella gestione e durevole nel tempo.

¹⁷⁸ Alnature Campus, Darmstadt, Germany, in "Transsolar KlimaEngineering", <https://transsolar.com/projects/alnature-campus>

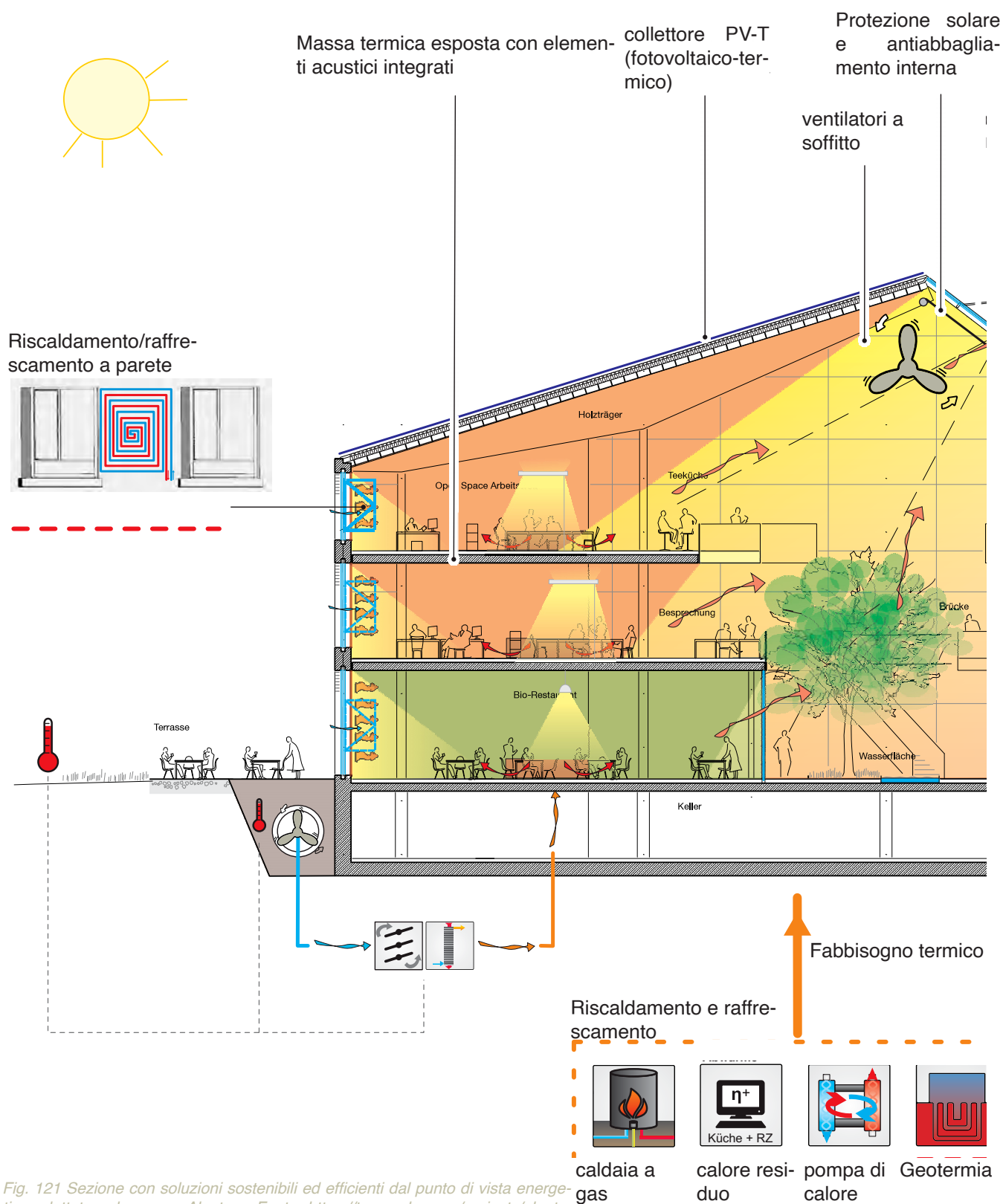
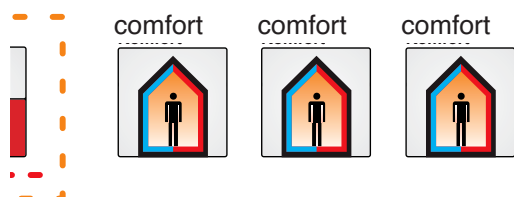
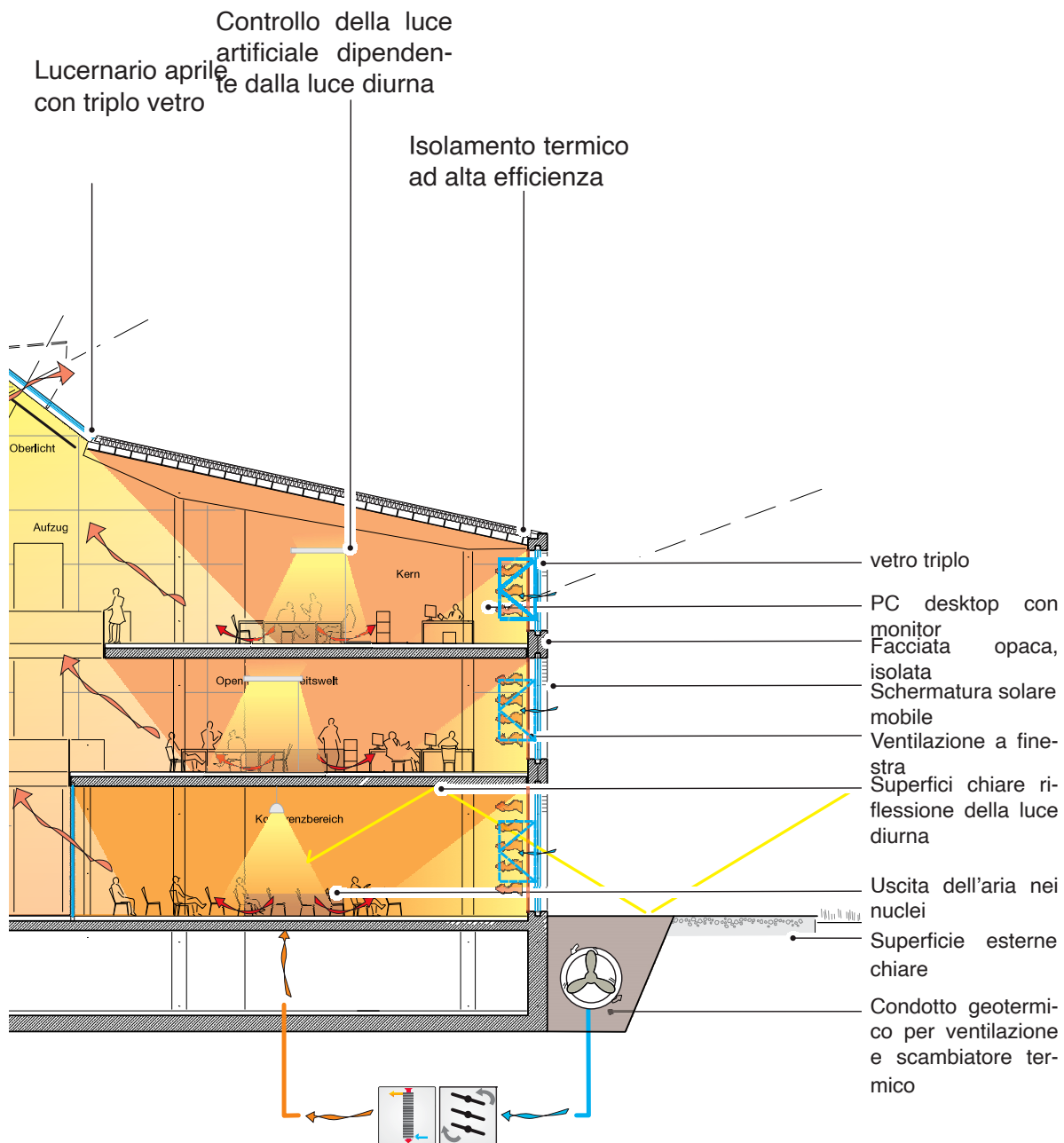
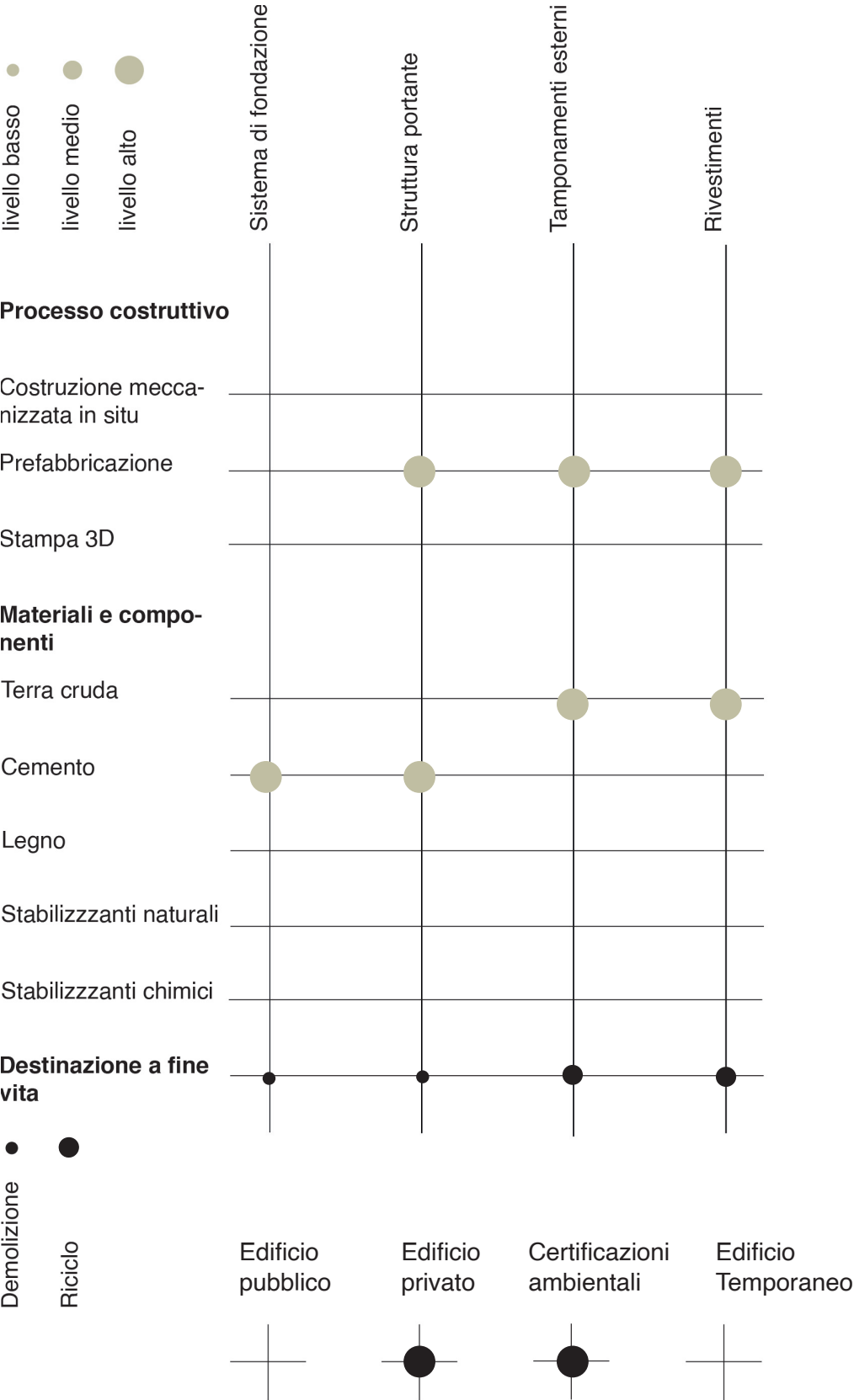


Fig. 121 Sezione con soluzioni sostenibili ed efficienti dal punto di vista energetico adottate nel campus Alnatura. Fonte: <https://transsolar.com/projects/alnatura-campus>



Riscaldamento dell'area ufficio tramite carichi interni, riscaldamento a parete e condotto sotterraneo

Scheda riassuntiva



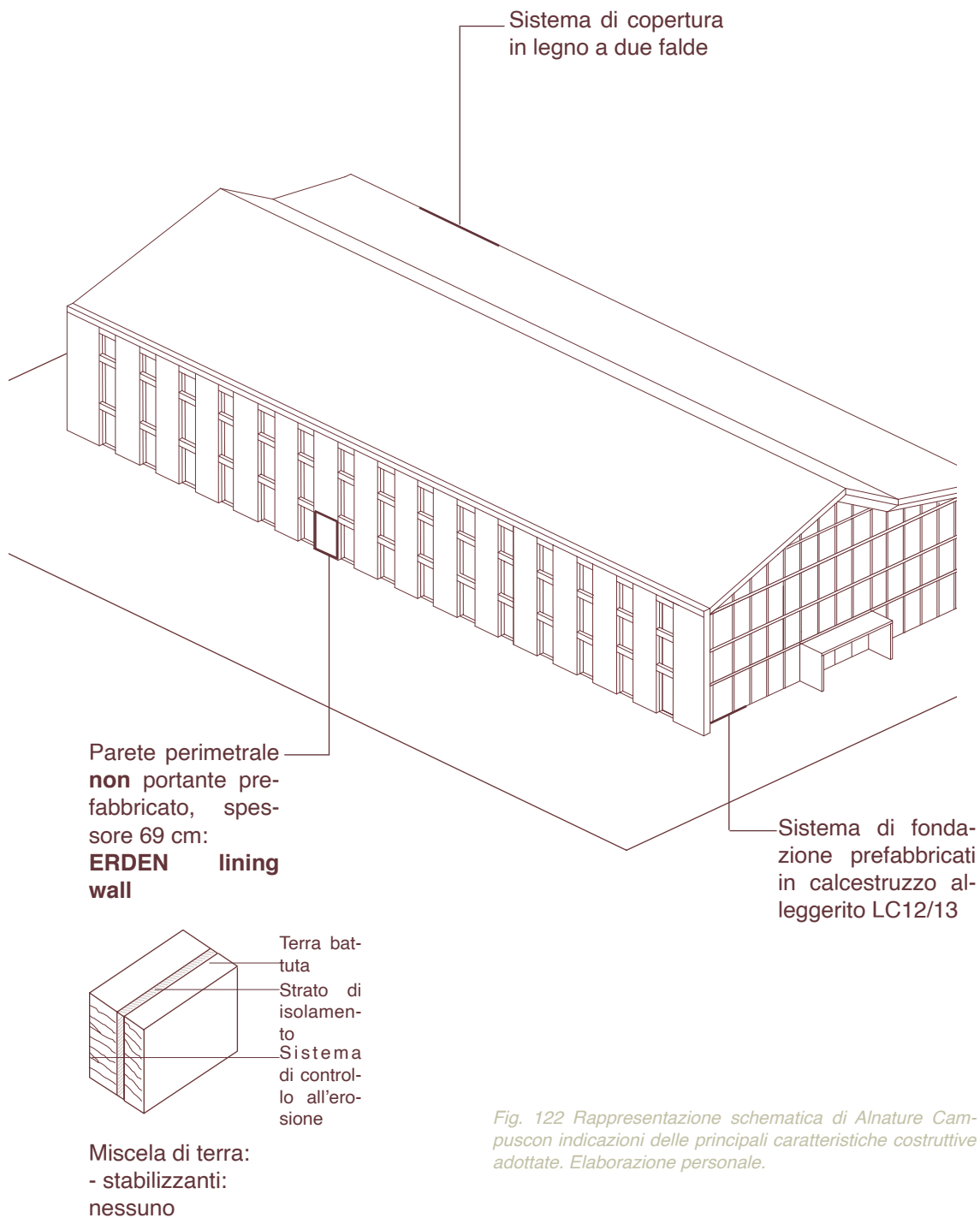


Fig. 122 Rappresentazione schematica di Alnature Campus con indicazioni delle principali caratteristiche costruttive adottate. Elaborazione personale.

Come nel caso del Ricola Herb Centre, anche l'Alnature Campus è una costruzione prefabbricata. La terra battuta, è stata impiegata nei tamponamenti esterni dell'edificio adibito a sede per uffici. Per migliorare l'isolamento termico è stato inglobato uno strato di ghiaia di vetri espanso riciclato nel cuore del blocco prefabbricato. La struttura portante in calcestruzzo e le fondazioni in cemento armato contribuiscono tuttavia ad aumentare l'impatto ambientale complessivo, rispetto a una costruzione interamente in terra cruda.

3.3

Processo costruttivo con stampa 3D

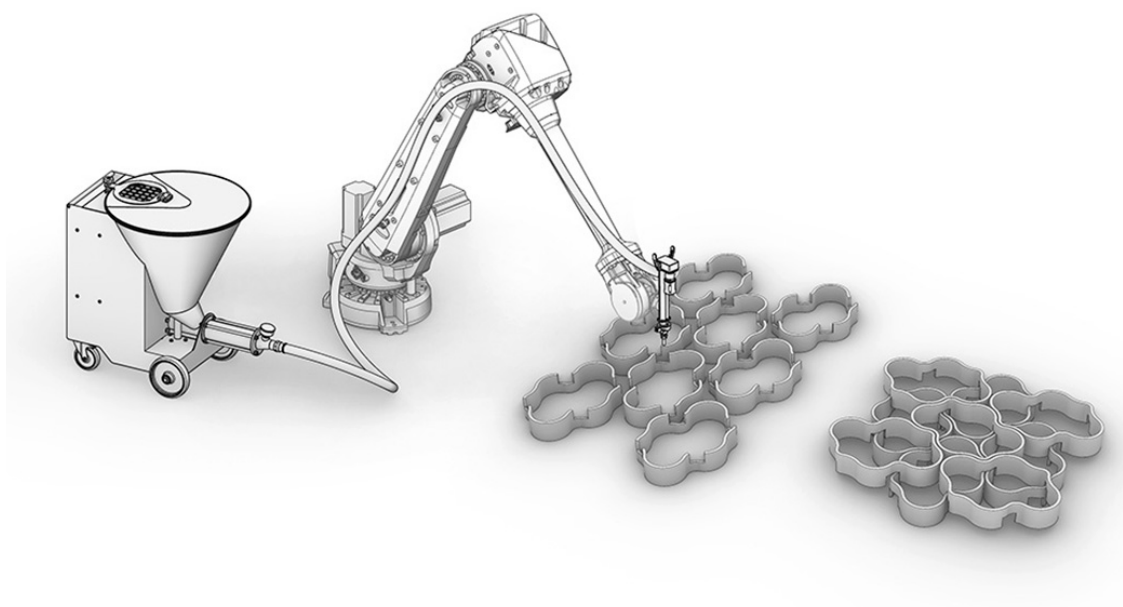


Fig. 123 Schema di stampa 3D by MCA. Fonte: <https://www.mcarchitects.it/progetti/un-fiore-a-san-servolo>

GAIA, 2018 (Italia)

Tipologia costruttiva:

Modulo sperimentale

Superficie:

20 m²

involucro edilizio stampato: 30 m²

Luogo:

Massa Lombarda (Italia)

Anno di ultimazione:

Inaugurato nel 2018

N piani:

1

Certificati

-

Premi:

-

Costo:

costo totale dei materiali 900 euro¹⁷⁹

Architetto:

Wasp

Impresa Costruttrice:

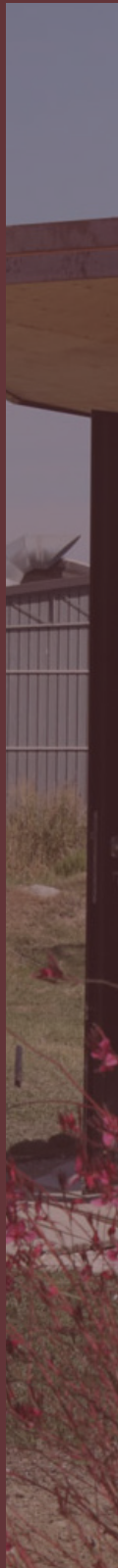
Wasp

Costruzione:

Wasp in collaborazione con Rice House

Stampante 3D:

Crane WASP



¹⁷⁹ Alberto Chiusoli, *La prima casa stampata in 3D con la terra / Gaia*, in “In casa, Comunicati stampa”, 28 settembre 2018. <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>



3.3 Processo costruttivo con stampa 3D



Fig. 124 Fotografia del modulo sperimentale stampato: GAIA
https://www.3dwasp.com/wp-content/uploads/2018/09/3D-printed-house-Gaia-WASP-Italy-photo1_WEB.jpg

IL PROGETTO:

Descrizione:

Gaia, inaugurata nel 2018 rappresenta un nuovo modello di casa ecosostenibile stampata in loco a Massa Lombarda nella sede dell'azienda italiana Wasp.

Si tratta del primo modulo stampato in 3D con la tecnologia CraneWasp, utilizzando la terra cruda come principale legante della miscela e rifiuti agricoli. Il modulo è di 30 m2 ed è caratterizzato da un guscio esterno stampato in 10 giorni¹⁸⁰ e travi interne in legno che sostengono un tetto in legno.

Fin dalle origini, l'impegno di Wasp è stato quello di sviluppare strumenti per la fabbricazione additiva a scala architettonica¹⁸¹ e l'inaugurazione di Gaia rappresenta un importante traguardo nel settore di stampa 3D.

TIPOLOGIA DI MATERIALI / COMPOSIZIONE:

Gaia è stata realizzata utilizzando una miscela composta da¹⁸²:

1. 25% suolo locale (30% argilla, 40% limo, 30% sabbia)
2. 40% paglia di riso tritata
3. 25% lolla di riso
4. 10% calce idraulica

Il tutto è stato impastato con una molazza¹⁸³, in modo da ottenere un composto omogeneo e lavorabile. I materiali naturali di scarto impiegati in Gaia sono provenienti dalla filiera del riso, in quanto sono risultati particolarmente efficienti dal punto di vista bioclimatico e salubrità degli ambienti.

Tale ricerca è stata possibile grazie alla collaborazione con la startup italiana RiceHouse, che opera nel campo della bioedilizia con l'uso degli scarti provenienti dalla produzione del riso¹⁸⁴.

PROCESSO COSTRUTTIVO: stampante 3d Crane WASP¹⁸⁵

La realizzazione del modulo abitativo Gaia inizia con la preparazione del sito: vengono gettate le fondamenta in calcestruzzo per garantire stabilità alla struttura, dopodiché la stampante 3D Crane WASP viene installata direttamente in cantiere. Questa fase iniziale è fondamentale per assicurare un corretto posizionamento e funzionamento del sistema di stampa.

Segue la fase di estrusione della miscela, durante la quale l'ugello della stampante deposita strati sovrapposti della miscela di materiali naturali composta da: terra cruda, paglia e lolla di riso, formando così pareti curve e stratificate. Il controllo digitale consente di ottenere geometrie complesse, precise e ripetibili, difficilmente ottenibili con le tecniche

180 Sebastian Jordahn, *La casa Gaia stampata in 3D è realizzata con materiali biodegradabili*, in "dezeen", 27 febbraio 2019. <https://www.dezeen.com/2019/02/27/gaia-wasp-3d-printed-house-biodegradable-video/>

181 Alberto Chiusoli, *La prima casa stampata in 3D con la terra I Gaia*, in "In casa, Comunicati stampa", 28 settembre 2018. <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>

182 WASP: *Gaia*, in "earth architecture", 15 ottobre 2024. <https://eartharchitecture.org/?p=1558>

183 Ibidem.

184 Sebastian Jordahn, *La casa Gaia stampata in 3D è realizzata con materiali biodegradabili*, in "dezeen"; 27 febbraio 2019. <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>

185 Per un ulteriore approfondimento riguardo il processo di stampa in dettaglio, si rimanda al paragrafo "PROCESSO DI STAMPA" a pagina 67, capitolo 2.



Fig.125 Planimetria del modulo stampato GAIA. Rappresentazione fuori scala.
Rappresentazione presa da: <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>



Fig.126 Sezione trasversale del modulo stampato GAIA. Rappresentazione fuori scala.
Rappresentazione tratta da: <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>

edilizie convenzionali¹⁸⁶.

Durante la stampa, viene anche integrata la parte tecnologica: le pareti vengono progettate per incorporare sistemi di ventilazione naturale, oltre a funzioni di isolamento termoacustico e canalizzazioni per impianti¹⁸⁷.

SISTEMI COSTRUTTIVI/

Struttura portante:

La struttura portante del modulo stampato in terra cruda è realizzata in legno, poiché in Italia la terra cruda non è riconosciuta dalle normative vigenti¹⁸⁸ come materiale da costruzione portante. La struttura è composta da otto pilastri in legno lamellare, incastrati nel sistema di fondazione, che a loro volta sorreggono il sistema di copertura, anch'esso realizzato in legno. Questa soluzione garantisce la fruibilità degli spazi in totale sicurezza.

Sistema di fondazione:

Il sistema di fondazione è costituito da una soletta in calcestruzzo.

Pareti perimetrali:

Le pareti esterne di spessore 40 cm sono completamente stampate e poggiano sulla soletta in calcestruzzo, al loro interno sono integrati i sistemi di ventilazione naturale, isolamento termo-acustico e gli impianti. La deposizione del materiale a base di terra cruda, paglia e lolla di riso viene controllata attraverso articolati intrecci in grado di conferire al contempo solidità costruttiva e variazione geometrica lungo l'intero sviluppo murario. Le pareti poi sono state rifinite internamente con una rasatura in argilla-lolla (RH400)¹⁸⁹, levigate e oliate con oli di lino.

Sistema di copertura:

La copertura è stata realizzata in legno lamellare sorretto da una struttura a pilastri anch'essi in legno lamellare con un isolamento in calce-lolla (RH300)¹⁹⁰ per permettere di raggiungere un fabbisogno energetico pari alla classe A4.

Aperture:

Gaia presenta un'ampia apertura orientata a Sud-Ovest dove oltre ad ottimizzare la luce naturale, sfrutta l'apporto passivo del sole.

186 Gaia, modulo abitativo stampato in 3D – WASP, in "Arketipo", 8 ottobre 2018. https://www.arketipomagazine.it/gaia-modulo-abitativo-stampato-in-3d-wasp/?utm_source=chatgpt.com

187 Gaia, modulo abitativo stampato in 3D – WASP, in "Arketipo", 8 ottobre 2018. https://www.arketipomagazine.it/gaia-modulo-abitativo-stampato-in-3d-wasp/?utm_source=chatgpt.com

188 Il principale riferimento normativo per le costruzioni è il Testo Unico delle Costruzioni (DPR 380/2001) e le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018), che non includono la terra cruda tra i materiali strutturali ammessi.

189 Sebastian Jordahn, La casa Gaia stampata in 3D è realizzata con materiali biodegradabili, in "dezeen"; 27 febbraio 2019.

190 Ibidem.



Immagini di cantiere



Fig.127 Stampa del primo layer sulla soletta di calcestruzzo. <https://www.youtube.com/watch?v=eEuObYmqalk&list=PLKSfMq7r3YolyGxCU8xhfNLVcLH5KMhxT&index=1>



Fig.128 Stampa del muro con l'integrazione di spazi appositi per gli impianti. https://www.youtube.com/watch?v=aUALAn_1hNw&list=PLKSfMq7r3YolyGxCU8xhfNLVcLH5KMhxT&index=2

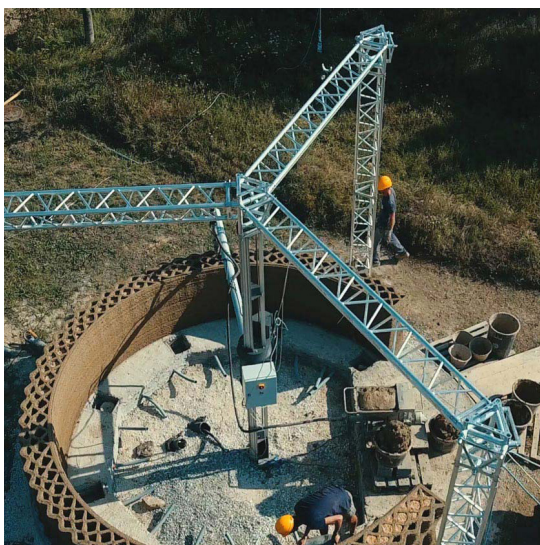


Fig.129 Immagini di cantiere. <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>



Fig.130 Incastro dei pilastri nella soletta in cemento. <https://www.youtube.com/watch?v=3gYc1F1FoGM&list=PLKSfMq7r3YolyGxCU8xhfNLVcLH5KMhxT&index=11>



Fig.131 Stampa dell'ultimo layer. <https://www.youtube.com/watch?v=iCiZmwztHHY&list=PLKSfMq7r3YolyGxCU8xhfNLVcLH5KMhxT&index=10>



Fig.132 Rappresentazione del sistema di copertura in legno lamellare sostenuto dai pilastri. <https://www.youtube.com/watch?v=3gYc1F1FoGM&list=PLKSfMq7r3YolyGxCU8xhfNLVcLH5KMhxT&index=11>

SOLUZIONI SOSTENIBILI e EFFICIENZA ENERGETICA:

Secondo l'azienda, l'impatto di Gaia sull'ambiente è quasi nullo. La casa non necessita di riscaldamento o aria condizionata, in quanto è in grado di mantenere una temperatura interna costante sia in estate che in inverno. Il progetto bioclimatico sviluppato da RiceHouse utilizza il contributo passivo del sole grazie alla posizione esposta a sud-ovest dell'edificio. La muratura stampata del modulo presenta una trasmittanza termica media di 0,249 W/m²K, un valore che, unito all'elevata efficienza degli elementi di copertura, sistemi di ventilazione naturale e di isolamento termo acustico consente di classificare Gaia in classe energetica A4¹⁹¹.

¹⁹¹ Sebastian Jordahn, *La casa Gaia stampata in 3D è realizzata con materiali biodegradabili*, in "dezeen", 27 febbraio 2019. <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>

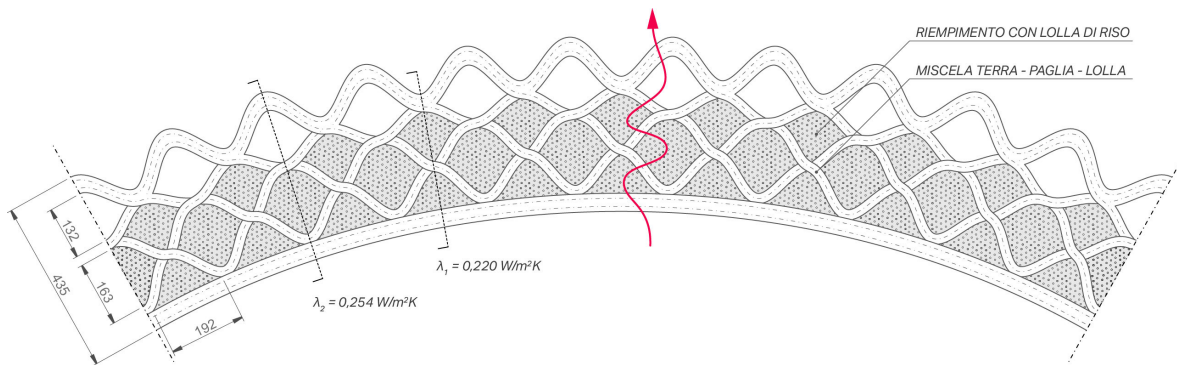


Fig.133 Sezione di dettaglio dell'infill. Rappresentazione tratta da: <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>

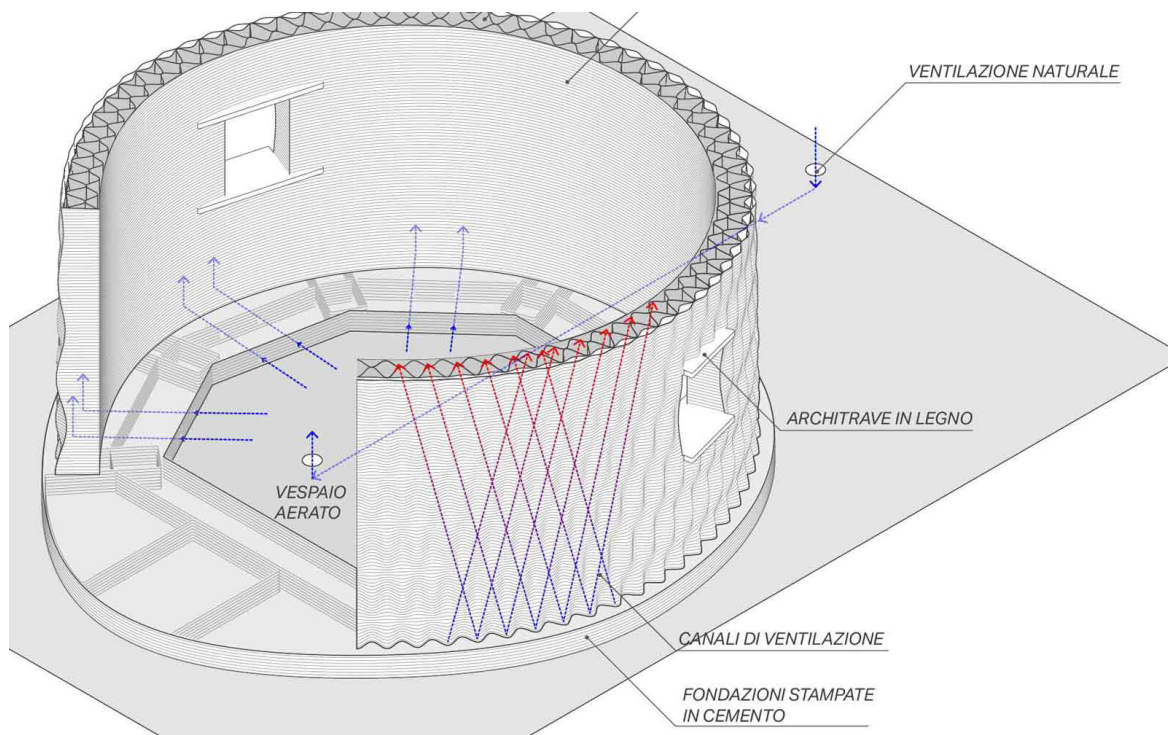
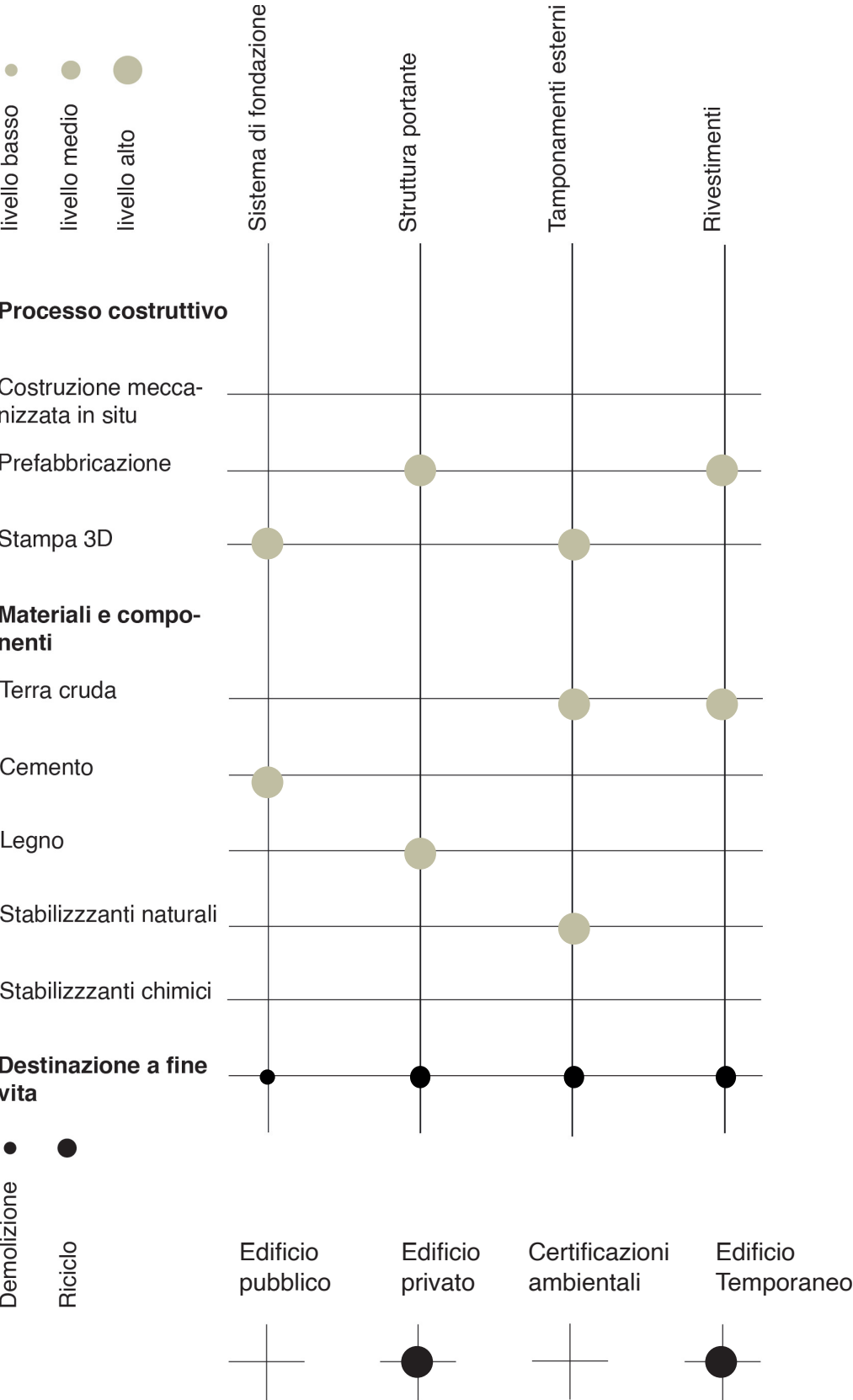


Fig.134 Spaccato assometrico con indicazione di dettagli tecnologici.
Rappresentazione tratta da: <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/>

Scheda riassuntiva



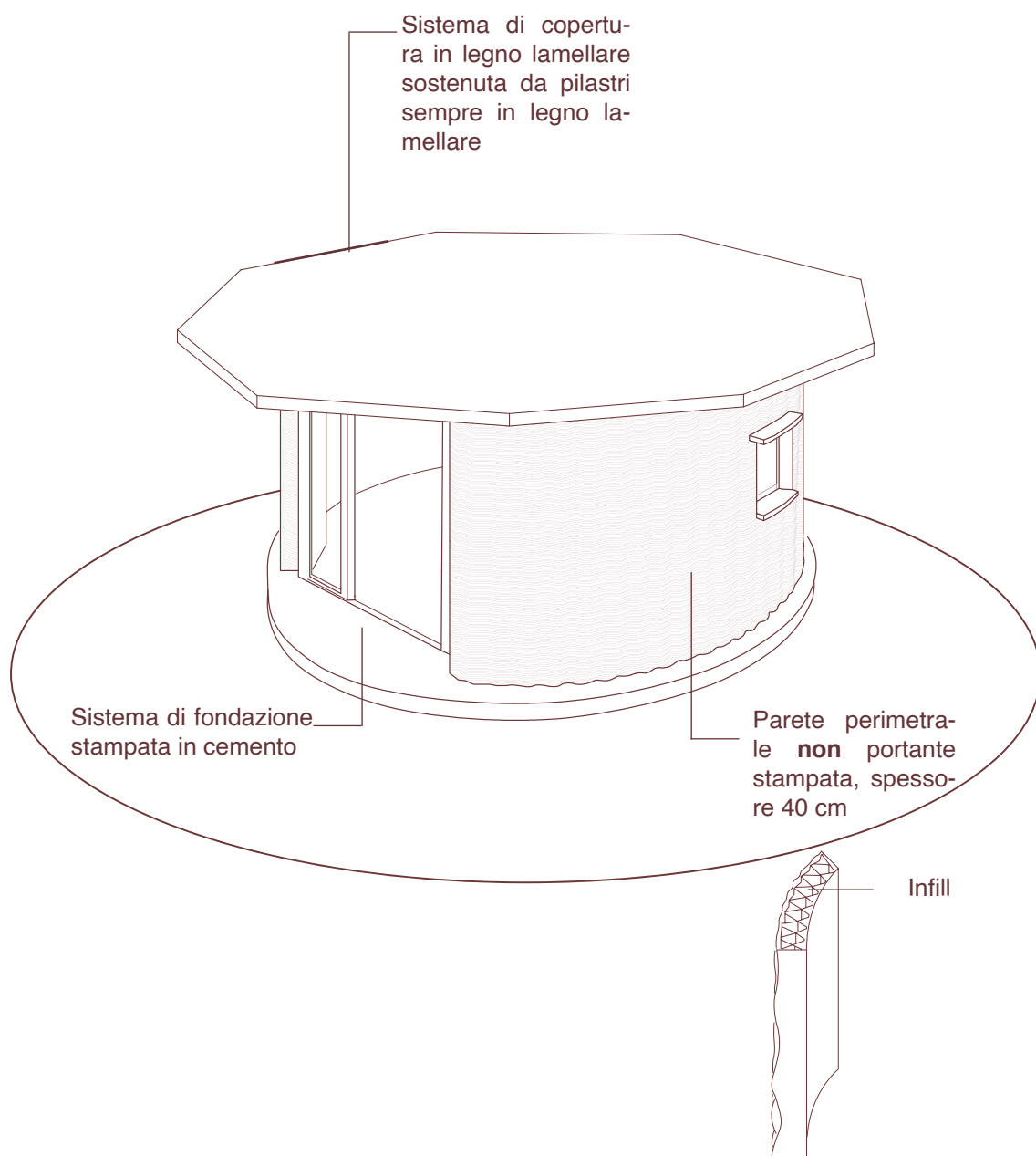


Fig. 135 Rappresentazione schematica di Gaia con indicazioni delle principali caratteristiche costruttive adottate. Elaborazione personale.

Miscela di terra:
- stabilizzanti:
lolla di riso, paglia di riso
tritata, calce idraulica

Gaia è un progetto sperimentale e temporaneo, interamente stampato in terra cruda con l'aggiunta di stabilizzanti naturali, come la lolla di riso. Le fondazioni, analogamente agli altri casi studio, sono realizzate in cemento armato, mentre la struttura portante è in legno, una scelta più sostenibile rispetto a soluzioni in calcestruzzo adottate in edifici come il Ricola Herb Centre e l'Al-natura Campus. Ad eccezione delle fondazioni, le pareti perimetrali possono essere reintegrate nel suolo senza generare inquinamento, e sia la struttura in legno che le pareti stampate risultano riciclabili e riutilizzabili, in linea con un approccio a basso impatto ambientale.

TECLA, 2021 (Italia)

Tipologia costruttiva:

casa sperimentale

Superficie:

60 m²

Luogo:

Massa Lombarda (Italia)

Anno di ultimazione:

2021

N piani:

1

Certificati:

Data la natura sperimentale del prototipo, le sue proprietà termiche, strutturali e di impermeabilità non sono state certificate.

Premi:

-

Costo:

-

Architetto:

Mario Cucinella

Impresa Costruttrice:

Wasp

Costruzione:

Wasp in collaborazione con:

- Mapei: Consulenza e fornitura dei materiali
- Milan Ingegneria: Consulenza strutturale
- Capoferri: Produzione ed ingegnerizzazione infissi
- RiceHouse: Consulenza e fornitura di bio-materiali
- Frassinago: Progettazione paesaggistica
- Lucifero's: Progettazione illuminazione
- Imola Legno: Fornitura e consulenza soluzioni in legno
- Primat • Terracruda®: Fornitura pavimento terra cruda
- Cefla: Fornitura soluzioni elettriche

Stampante 3D:

Crane WASP





3.3 Processo costruttivo con stampa 3D



Fig.136 Fotografia di Lago Corazza. Tratta da: <https://archello.com/it/news/dettaglio-struttura-in-terra-stampata-in-3d-del-protipo-tecla-ravenna>

IL PROGETTO:

Descrizione:

TECLA (il nome deriva da Technology and clay), rappresenta un innovativo concetto di abitazione circolare, costituito da due elementi a forma di cupola deformata. I due ambienti ospitano la zona giorno e la zona notte con bagno e includono arredi stampati direttamente all'interno della struttura.

Questa struttura è realizzata in gran parte con materiali riutilizzabili e riciclabili, raccolti dal terreno locale. Si tratta di un prototipo innovativo di habitat stampato con più stampanti 3D operanti simultaneamente, disegnata da Mario Cucinella e ingegnerizzata da WASP, in cui confluiscono pratiche vernacolari, un'attenta analisi del clima e dei principi bioclimatici, l'impiego di materiali provenienti dalla natura, nonché l'implementazione delle più avanzate tecnologie legate alla stampa tridimensionale. La costruzione di TECLA iniziata a settembre del 2019 si è conclusa nel 2021. Il primo prototipo viene realizzato con CraneWasp a Massa Lombarda, nella sede di WASP, l'intenzione è di estendere il progetto in tutto il mondo. Il processo costruttivo può essere infatti replicato grazie al Maker Economy Starter Kit di WASP¹⁹².

TIPOLOGIA DI MATERIALI / COMPOSIZIONE:

I materiali utilizzati per la costruzione sono ottenuti a partire da materie prime naturali. Nella realizzazione di TECLA, l'elaborazione della miscela è avvenuta attraverso la consulenza dell'azienda Mapei e Rice house. Con Mapei è stato studiato un mix design in grado di ottenere una miscela con una reologia idonea alla fase di stampa con prestazioni meccaniche adeguate al campo applicativo¹⁹³.

Le soluzioni Mapei che andranno a comporre la miscela sono:

- **MAPESOIL 100:** agente stabilizzante in polvere per il consolidamento dei terreni, consente in fase di miscelazione la progressiva disgregazione dell'impasto a base di terra cruda e acqua, favorendo la durabilità e la resistenza al dilavamento della miscela una volta estrusa;
- **DYNAMON SR4:** additivo super fluidificante, favorisce il mantenimento della lavorabilità dell'impasto e la pompabilità anche a distanza di due ore;
- **PLANICRETE:** lattice di gomma sintetica, impiegato per il confezionamento di boiacche atte a promuovere l'adesione agli strati già induriti;
- **PLANISEAL WR 100:** protettivo idrofobizzante pronto all'uso, applicato con spruzzino nebulizzatore sul paramento essiccato, risulta molto efficace nell'impermeabilizzazione della struttura già a distanza di 12 ore.

Oltre alle soluzioni elencate, la miscela contiene sabbia, argilla, limo e lolla di riso. A questo composto viene aggiunto un intonaco esterno a base naturale di argilla, calce idraulica e pula di riso, con funzione di rendere l'involucro impermeabile.

¹⁹² Il Maker Economy Starter Kit è un container con all'interno tutto il necessario per la realizzazione in autonomia della propria casa. Il kit oltre a includere tutti i modelli della linea Delta Wasp e CraneWasp, fornisce anche i sistemi di taglio, di estrusione, di alimentazione, di riciclaggio e i sistemi per la frantumazione dei materiali. Fonte: *Tecla* in "WASP" <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>

¹⁹³ *La ricerca e le tecnologie Mapei per TECLA*, in "MAPEI", 4 novembre 2019. <https://www.mapei.com/it/it/news/dettaglio/2019/11/04/la-ricerca-e-le-tecnologie-mapei-per-tecla>

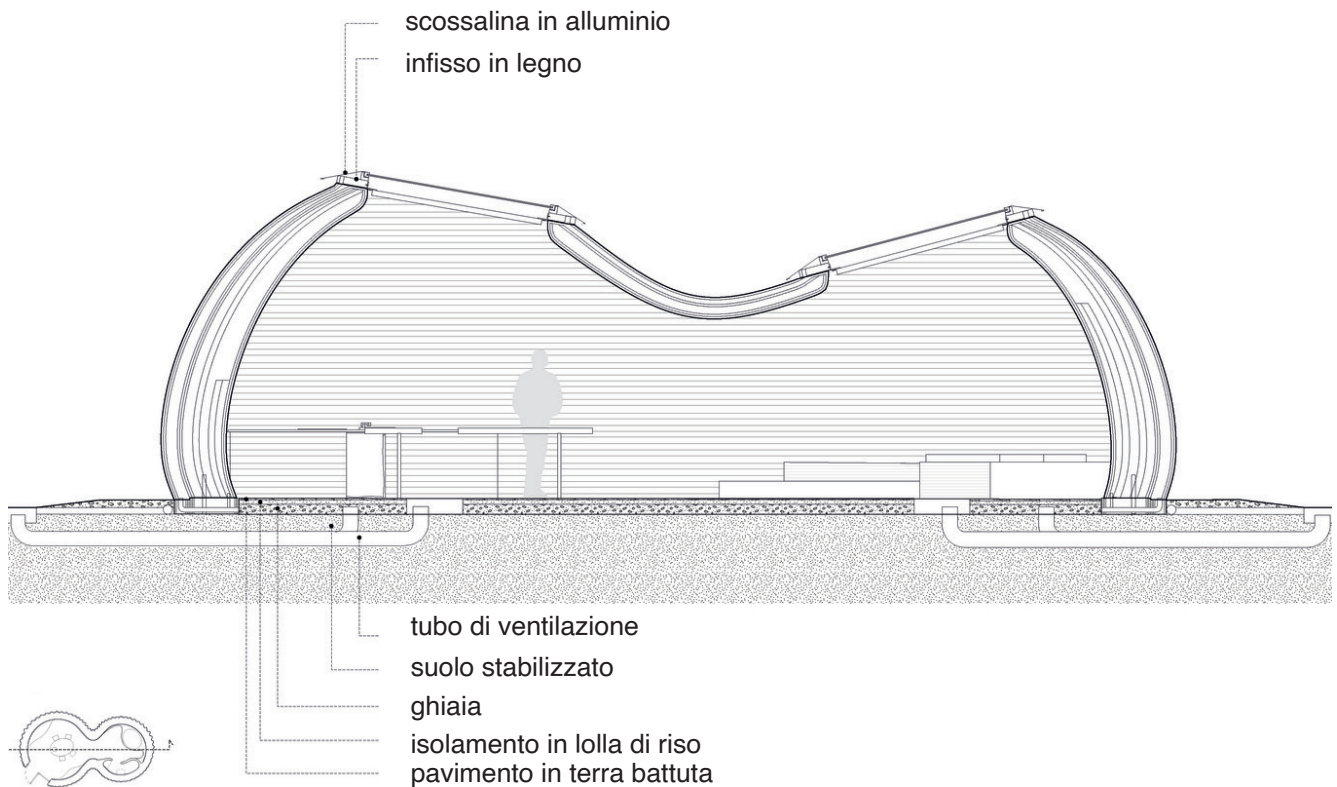
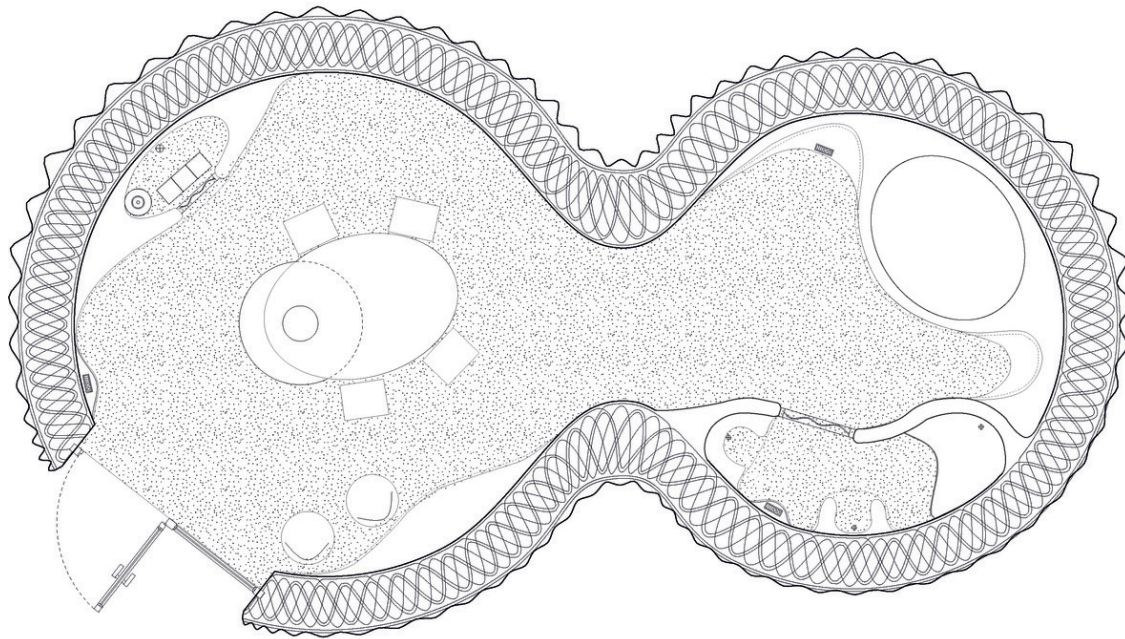


Fig.137 Pianta e sezione trasversale. Rappresentazioni fuori scala. Fonte: <https://archello.com/it/news/dettaglio-struttura-in-terra-stampata-in-3d-del-prototipo-tecla-ravenna>

PROCESSO COSTRUTTIVO:

Tecla è stata realizzata tramite stampa 3D utilizzando la tecnologia Crane Wasp.

WASP ha impiegato due bracci di stampa sincronizzati, controllati da un software in grado di ottimizzare i movimenti, prevenire collisioni e garantire un processo efficiente. Ogni unità di stampa copriva un'area di 50 metri quadrati.

Le stampanti hanno erogato la miscela a una velocità tale da consentire la costruzione del modulo abitativo in pochi giorni. Ogni abitazione TECLA può essere completata in 200 ore di stampa. Il modulo è composto da un totale di 350 strati di terra estrusa, organizzati in fasce da 12 millimetri, equivalenti a circa 150 chilometri di materiale stampato. L'edificio impiega 60 metri cubi di materiali naturali, con un consumo energetico medio inferiore ai 6 kW¹⁹⁴.

SISTEMI COSTRUTTIVI/:

Struttura portante:

I muri perimetrali in terra battuta hanno una funzione portante. La forma a cupola deformata è stata concepita per garantire stabilità strutturale sia durante la fase di stampa che dopo il completamento, poiché la terra cruda è un materiale che resiste prevalentemente a compressione¹⁹⁵.

Oltre agli aspetti strutturali, questa configurazione è influenzata anche dalla conformazione della stampante, che ha una struttura esagonale e limita la geometria realizzabile.

Sistema di fondazione:

Le fondamenta di TECLA rappresentano l'unica parte del prototipo realizzata interamente in cemento stampato¹⁹⁶. È stata creata una sorta di trave rovescia sotto il muro, mentre il terreno è stato compattato, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale rispetto alle fondazioni tradizionali in calcestruzzo, uno dei materiali più inquinanti nell'edilizia. Inoltre, per garantire la stabilità della struttura, gli architetti hanno sviluppato un sistema di ancoraggio dei primi strati della cupola alla fondazione mediante l'uso di tubi metallici.

Pareti perimetrali:

I muri perimetrali sono stati interamente stampanti con la tecnologia di CraneWasp. La soluzione a doppia cupola ha permesso di integrare in un'unica struttura le funzioni di supporto portante, copertura e rivestimento esterno, conferendo alla costruzione elevate prestazioni sotto molteplici aspetti.

Per quanto riguarda gli impianti, la stampa 3D si è rivelata una soluzione particolarmente efficiente. Fin dalle prime fasi di progettazione, i dettagli del sistema impiantistico sono stati incorporati nello script di stampa, consentendo la creazione di apposite tasche senza la necessità di realizzare tracce a posteriori. Inoltre, una volta terminato il ciclo di vita dell'edificio, cavi e tubazioni potranno essere facilmente rimossi, lasciandol'involucro completa-

194 Collin anderson, *Detail: 3D-printed earthen structure of the TECLA prototype, Ravenna*, in "archello", 23 ottobre 2023. <https://archello.com/news/detail-3d-printed-earthen-structure-of-the-tecla-prototype-ravenna>

195 Chiara Samorì, *Cucinella: "Ecco come il con il 3D abbiamo creato una casa in terra cruda"*, in "Ingegno", 1° maggio 2021. <https://www.ingenio-web.it/articoli/cucinella-ecco-come-con-il-3d-abbiamo-creato-una-casa-in-terra-cruda/>

196 Collin anderson, *Detail: 3D-printed earthen structure of the TECLA prototype, Ravenna*, in "archello", 23 ottobre 2023. <https://archello.com/news/detail-3d-printed-earthen-structure-of-the-tecla-prototype-ravenna>



Immagini di cantiere

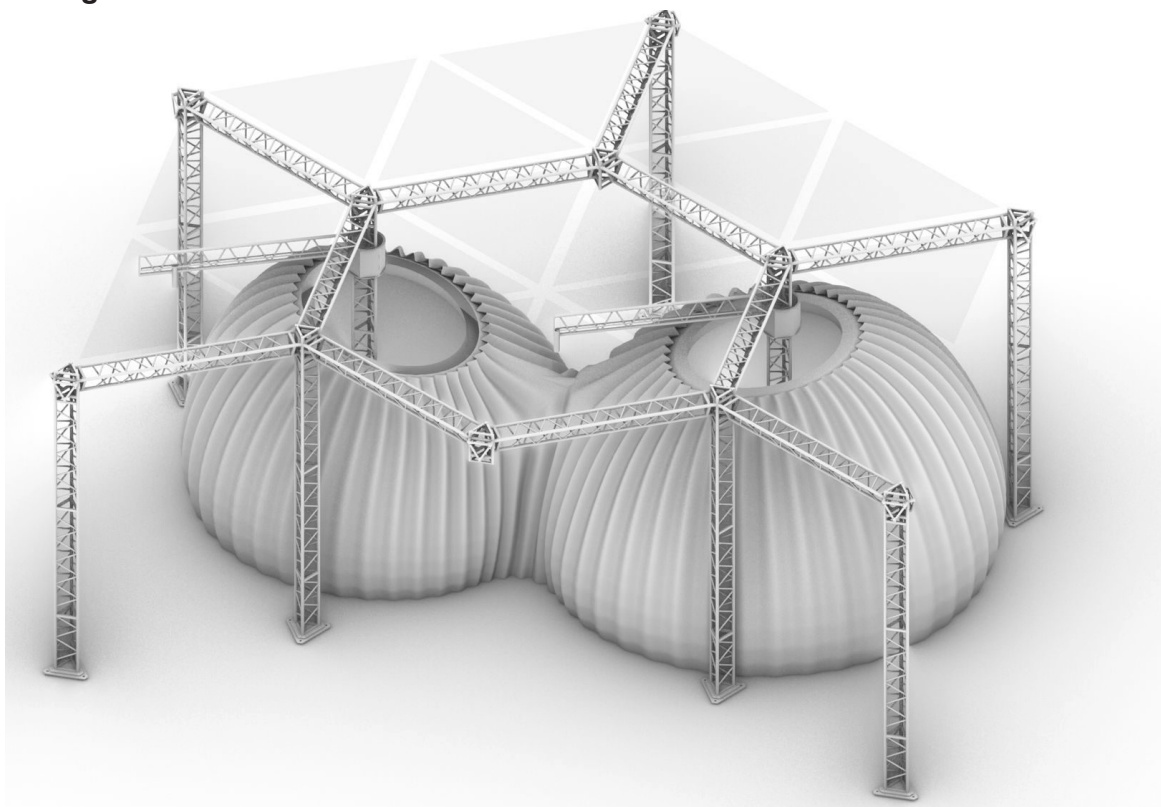


Fig. 138 Schema della modalità costruttiva con Crane Wasp. Immagine tratta da: <https://www.infobuildenergia.it/tecla-la-casa-sostenibile-in-3d-di-mario-cucinella/>



Fig.139 Immagine di cantiere. <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>



Fig.140 Immagine di cantiere. <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>

mente pulito. Questo aspetto favorisce il ritorno dei materiali naturali alla terra, completando il loro ciclo senza lasciare impatti permanenti¹⁹⁷.

Una delle principali innovazioni della tecnologia 3D è l'estrema flessibilità della forma. La parametrizzazione permette di ottenere forme complesse e variabili. Questa libertà, oltre a consentire la realizzazione di nuove forme, può avere importanti ripercussioni anche sulle prestazioni dell'edificio, in particolare su quelle dell'involucro che, basandosi su parametri geometrici predefiniti, permette di adattarsi alle condizioni climatiche, adottando di volta in volta la configurazione più efficiente per l'ambiente in cui è collocato.

Per l'ottimizzazione dell'infill di TECLA sono presi in considerazione tre parametri che sono la ventilazione e ombreggiamento¹⁹⁸ (affidato allo strato più esterno), l'isolamento (ottenuto grazie al riempimento delle cavità intermedie con lolla di riso, lana di pecora) e la massa termica che aumenta all'aumentare delle nervature di terra dell'*infill*.

SOLUZIONI SOSTENIBILI e EFFICIENZA ENERGETICA

Ciclo di vita /Demolizioni

L'utilizzo di un materiale locale e naturale, come la terra cruda, consente di evitare sprechi e ridurre l'impatto ambientale, rendendo questo progetto un modello pionieristico di edilizia a basse emissioni di carbonio.

Le case TECLA rappresentano un esempio di economia circolare: nascono dalla terra e, una volta completato il loro ciclo di vita, possono ritornare alla terra riducendo al minimo le tracce inquinanti. Tuttavia, nonostante l'impegno nella realizzazione di un'abitazione completamente circolare, per garantire la stabilità dell'edificio è stato necessario aggiungere, seppur in piccole quantità (<5%), dell'additivo fluidificante¹⁹⁹; inoltre, anche le fondazioni sono realizzate in cemento.

Sebbene non sia possibile azzerare completamente le emissioni, le soluzioni adottate per TECLA mirano a ridurle al minimo. Ad esempio, i cavi e le tubazioni sono stati progettati per essere facilmente rimossi, lasciando l'involucro completamente pulito al termine del suo ciclo di vita.

Secondo l'architetto progettista TECLA è ideale per soluzioni temporanee, ma il suo potenziale va ben oltre. Ad esempio, i moduli prefabbricati utilizzati per l'accoglienza post-sisma: spesso composti da pannelli sandwich, generano grandi quantità di rifiuti quando devono essere smaltiti. TECLA potrebbe rappresentare un'alternativa più sostenibile²⁰⁰.

197 Chiara Samorì, *Cucinella: "Ecco come il con il 3D abbiamo creato una casa in terra cruda"*, 1° maggio 2021. <https://www.ingenio-web.it/articoli/cucinella-ecco-come-con-il-3d-abbiamo-creato-una-casa-in-terra-cruda/>

198 *Il primo prototipo di abitazione ecosostenibile stampato in 3D in terra cruda*, in "MCA". <https://www.mcarchitects.it/progetti/tecla-technology-and-clay>

199 Chiara Samorì, *Cucinella: "Ecco come il con il 3D abbiamo creato una casa in terra cruda"*, in "Ingegno", 1° maggio 2021. <https://www.ingenio-web.it/articoli/cucinella-ecco-come-con-il-3d-abbiamo-creato-una-casa-in-terra-cruda/>

200 *Mario Cucinella on designing for our time by learning from the past*, in "Archello" 18 giugno 2024. <https://www.mcarchitects.it/notizie-it/mario-cucinella-on-designing-for-our-time-by-learning-from-the-past>



Fig.141 Fotografia di Lago Corazza. <https://archello.com/it/news/dettaglio-struttura-in-terra-stampata-in-3d-del-prototipo-tecla-ravenna>

Energia e Sostenibilità:

Le abitazioni realizzate con questa tecnologia e in terra si distinguono per la loro elevata efficienza bioclimatica, il benessere degli ambienti interni e l'ottimizzazione dei consumi energetici. Grazie alle caratteristiche costruttive, il sistema risulta particolarmente performante: i muri spessi, composti da più strati di terra, garantiscono un'elevata inerzia termica. Inoltre, la presenza di camini di ventilazione, che conferiscono alla superficie la tipica increspatura, favorisce sia la ventilazione naturale sia l'auto-schermatura dell'involucro²⁰¹.

Costo:

Per quanto riguarda i costi, al momento non esiste una stima precisa dei costi di costruzione, la materia prima incide pochissimo, poiché disponibile direttamente in loco. Questo consente di ridurre drasticamente le spese di trasporto. Il principale costo attuale è legato alla manodopera specializzata necessaria per gestire le macchine, al costo delle macchine e della stampante 3D²⁰².

201 Chiara Samorì, *Cucinella: "Ecco come il con il 3D abbiamo creato una casa in terra cruda"*, in "Ingegno", 1° maggio 2021. <https://www.ingenio-web.it/articoli/cucinella-ecco-come-con-il-3d-ab-biamo-creato-una-casa-in-terra-cruda/>

202 Ibidem.

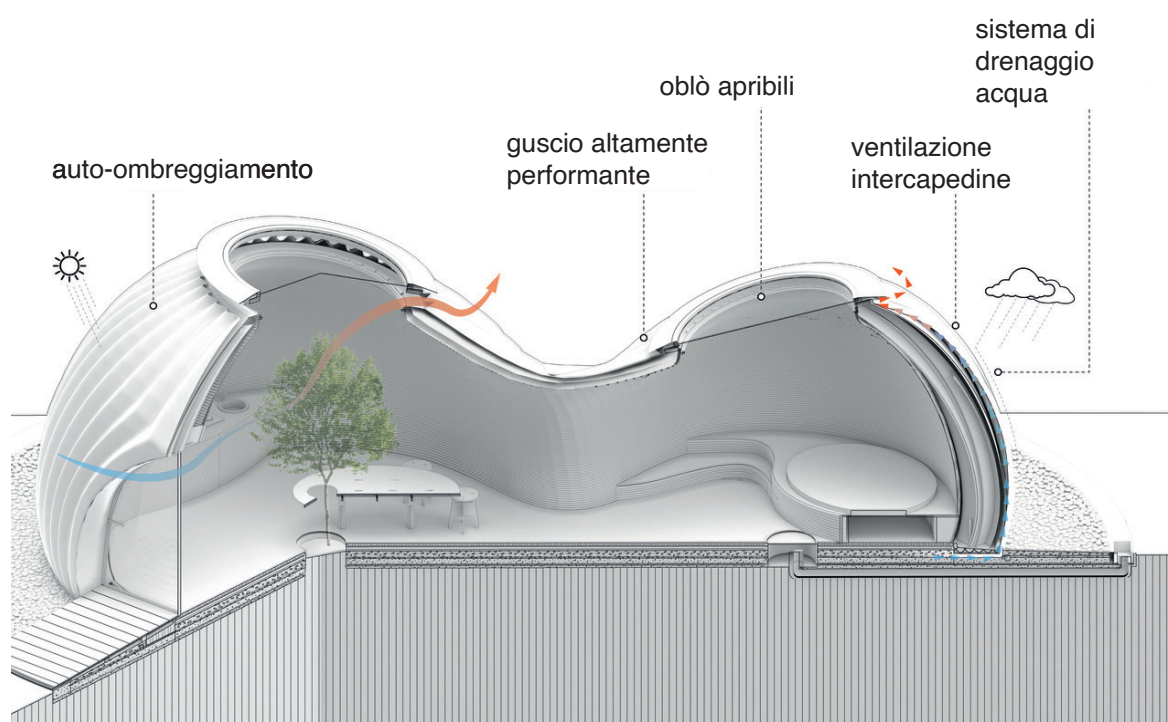


Fig.142 Spaccato assonometrico TECLA. Tratto da: <https://archello.com/it/article/2321/attachments/drawings/4>

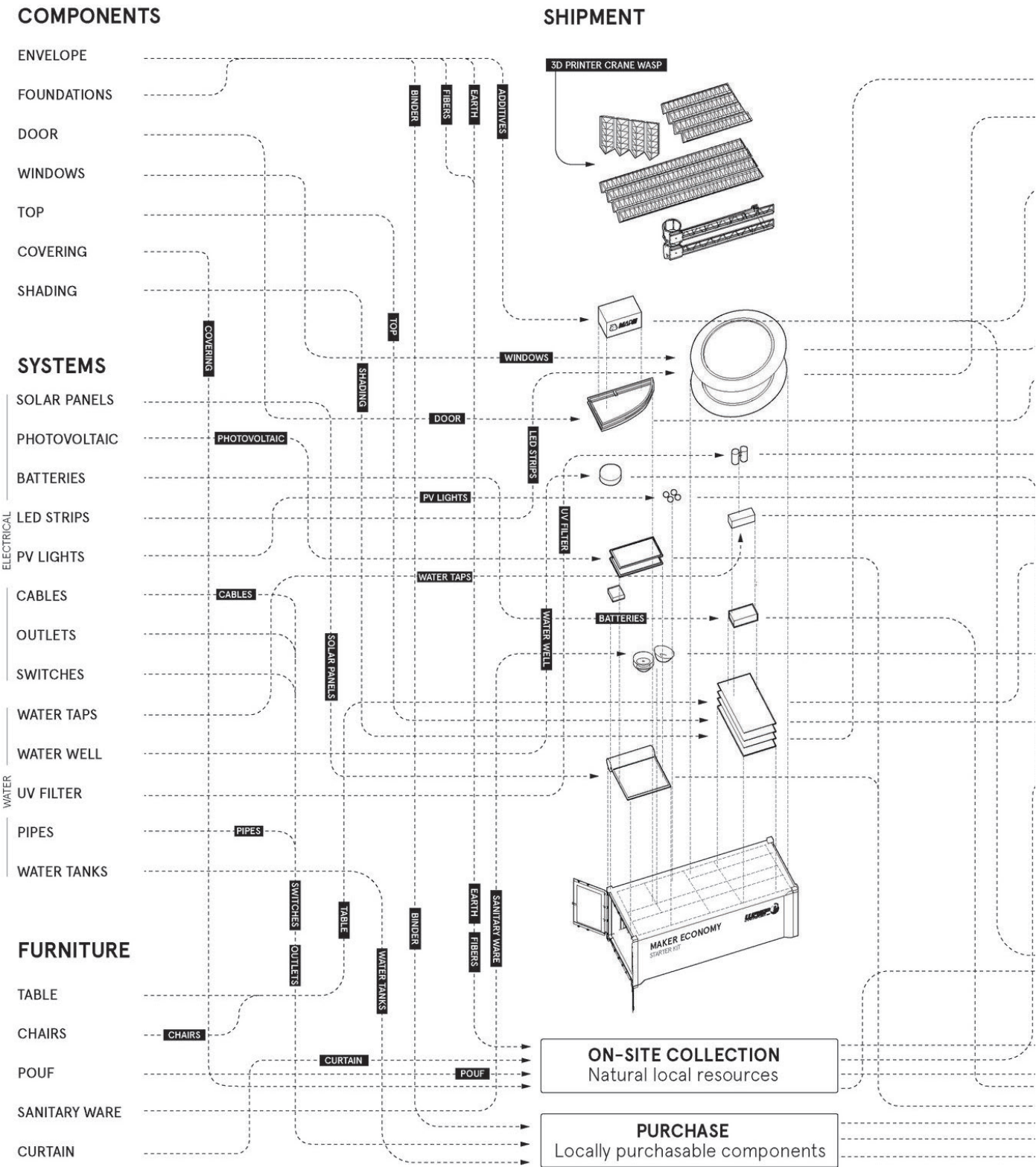
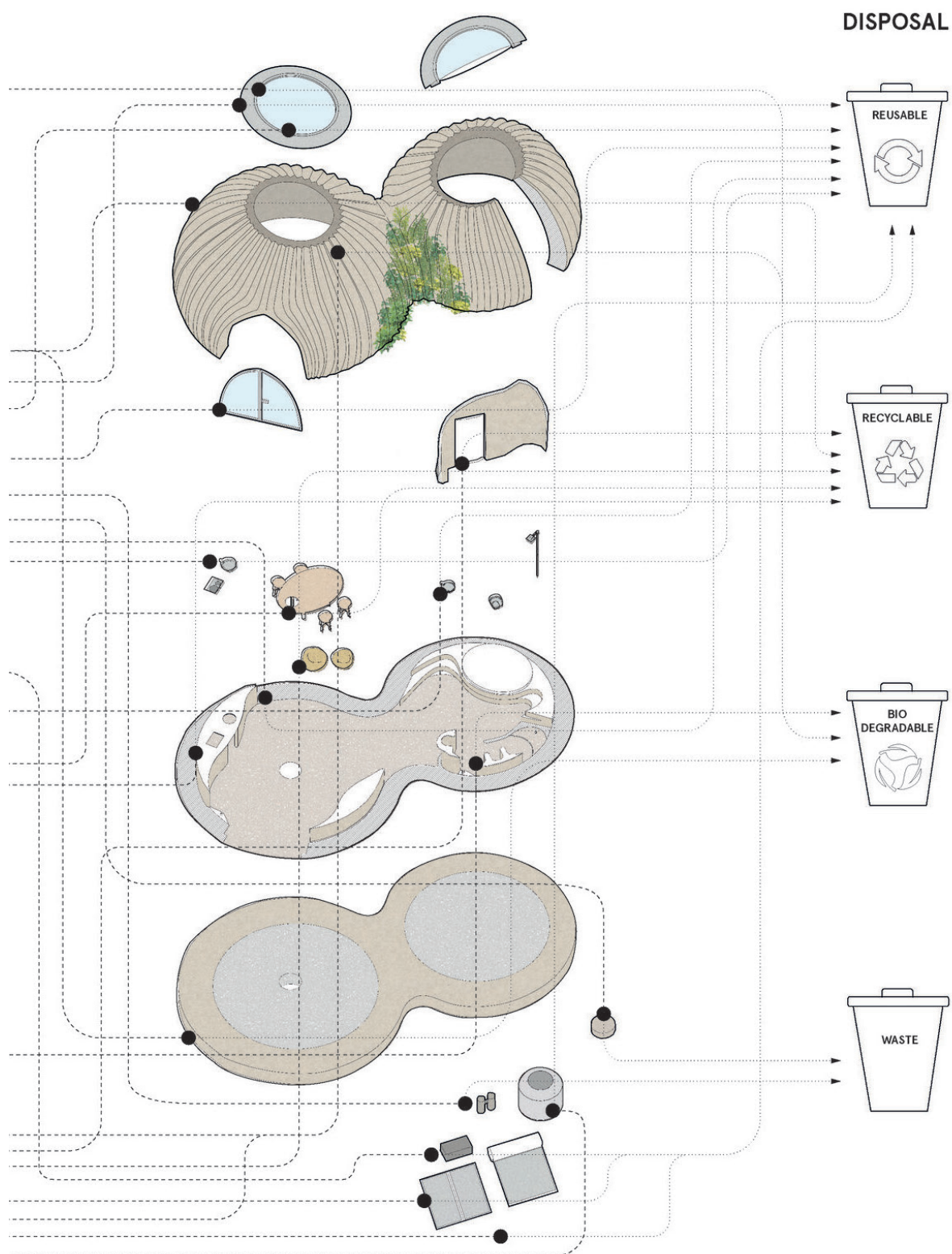
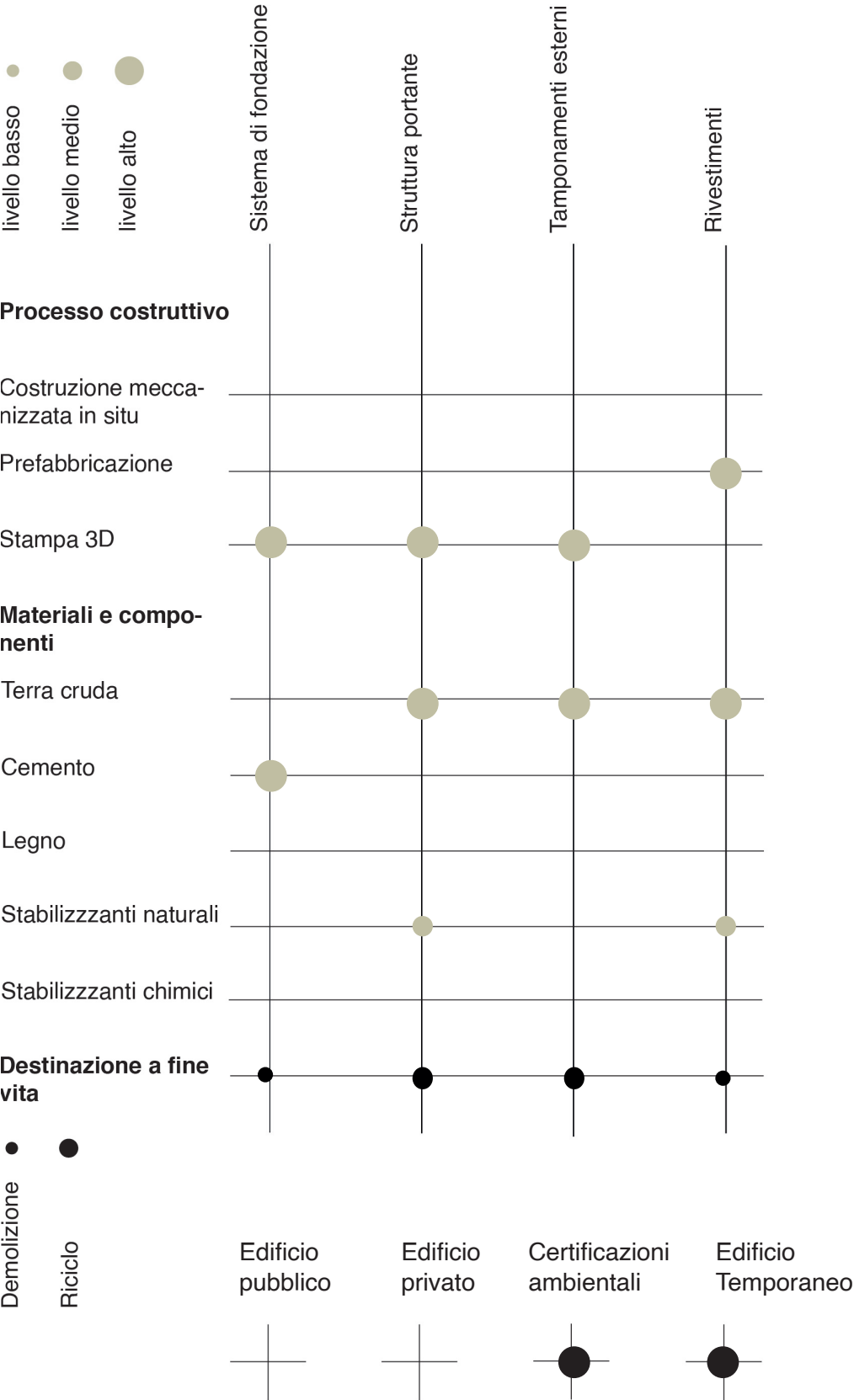


Fig. 143 Rappresentazione del ciclo di vita dei componenti che costituiscono TECLA. Immagine tratta da: <https://archello.com/it/article/2321/attachments/drawings/4>



Scheda riassuntiva



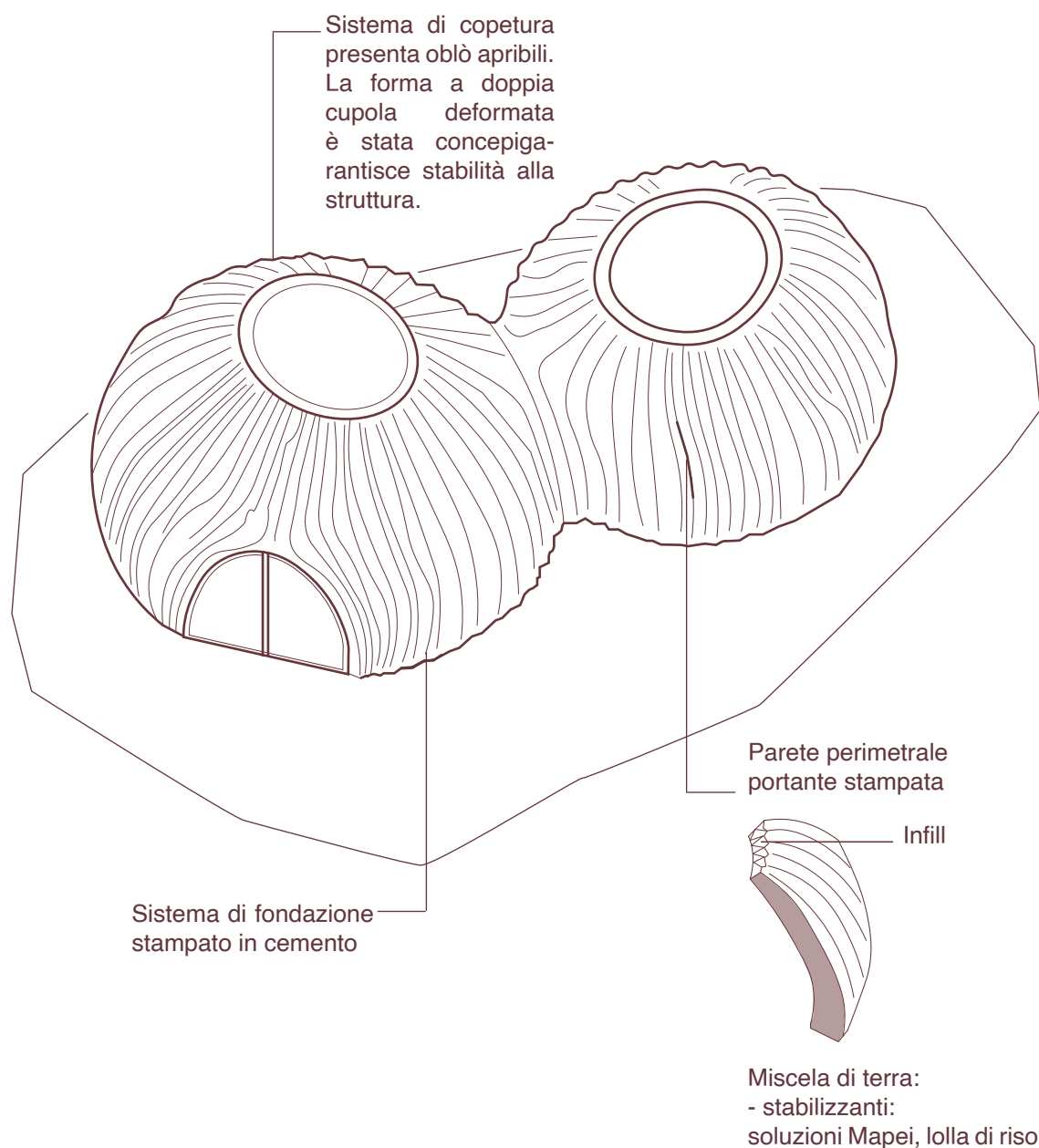
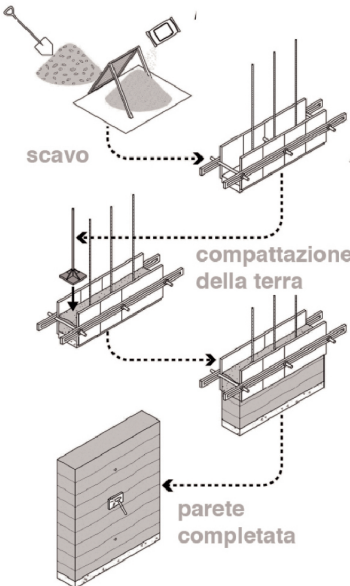
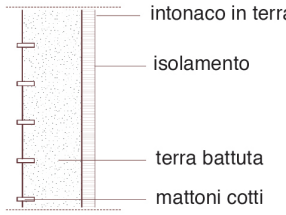
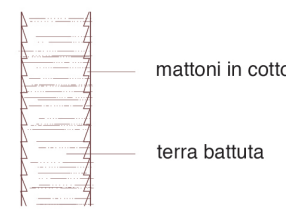
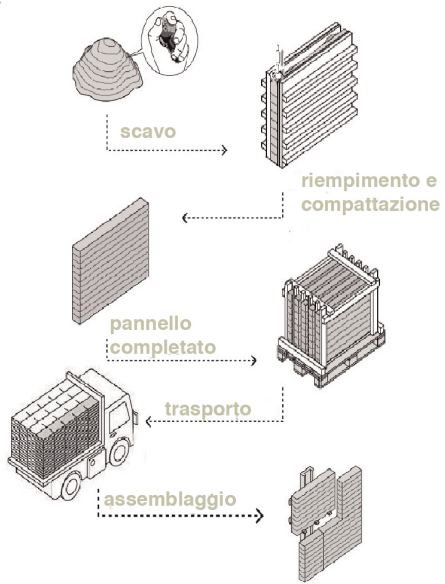
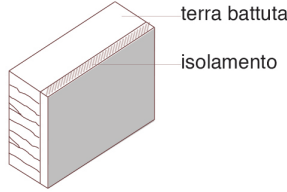
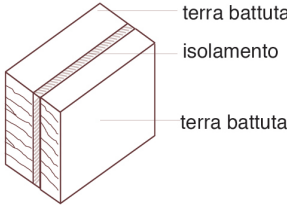


Fig. 144 Rappresentazione schematica di Tecla con indicazioni delle principali caratteristiche costruttive adottate. Elaborazione personale.

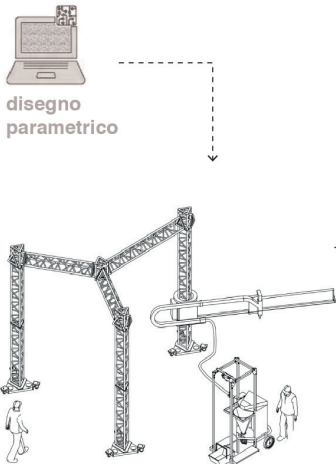
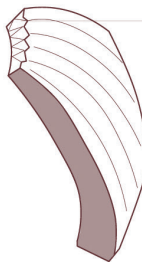
Come nel caso di Gaia, anche Tecla è un progetto sperimentale realizzato tramite stampa 3D on site con terra cruda. A differenza di Gaia, le pareti perimetrali stampate non solo delimitano l'involucro, ma assolvono anche alla funzione di struttura portante. Sono stati impiegati stabilizzanti naturali, tra cui lolla di riso e canapa, per migliorare le prestazioni meccaniche della miscela. Le fondazioni, come negli altri casi studio, sono realizzate in cemento armato, rappresentando così uno dei pochi elementi non biodegradabili del sistema edilizio.

3.4 Confronto tra casi studio

	Caratteristiche generali	Materia prima / Filiera
Casa Rauch (AT, 2008)	Edificio residenziale monofamiliare - Superficie: 9 657 mq circa - N piani: 3 - Anno di ultimazione: 2008 - Progettista: Roger Bolthausser, Martin Rauch	- 85% terra locale da scavo, - legno di rovere locale - stabilizzanti: nessuno
Casa de Tapia (ES, 2014/20)	Edificio residenziale monofamiliare - Superficie: 276 mq - N piani: 3 - Anno di ultimazione: 2020 - Progettista: EDRA Arquitectura	- 80% terra locale km 0 - stabilizzanti: paglia e calce idraulica
Cimitero Bushey (UK, 2017)	Edificio pubblico cimiteriale - Superficie: 670 mq - N piani: 1 - Anno di ultimazione: 2017 - Progettista: Waugh Thistleton Architects	- Terra locale + aggregati di cava locale - stabilizzanti: 8-10% di cemento Portland
Ricola Herb Centre (CH, 2013)	Edificio industriale - Superficie: 3000 mq - N piani: 1 - Anno di ultimazione: 2013 - Progettista: Herzog & de Meuron	- Terra locale + marna e materiale da scavo - stabilizzanti: nessuno
Alnatura Campus (DE, 2019)	Edificio industriale - Superficie: 13 500 mq - N piani: 3 - Anno di ultimazione: 2019 - Progettista: Martin Hass - Studio 2050	- Terra locale: il nucleo dei blocchi è composto da ghiaia, vetro espanso - legno di provenienza locale

Processo produttivo	Sistemi costruttivi	
Compattazione in casseri con attrezzi meccanici on site  scavo compattazione della terra parete completata	- Pareti portanti in terra (45 cm), con strato di isolamento termico e riscaldamento integrato; - Sistema di fondazioni continue in calcestruzzo C15. - Pareti portanti in terra (45 cm), riscaldamento a parete - Sistema di fondazioni continue in calcestruzzo, - Sistema di copertura ligneo - Pareti monolitici in terra battuta portante (40 cm); - Sistema di fondazione: cemento - sistema di copertura: in zinco con aggraffatura	 intonaco in terra isolamento terra battuta mattoni cotti  mattoni in cotto terra battuta  rivestimento terra battuta isolamento
Prefabbricazione off site  scavo riempimento e compattazione pannello completato trasporto assemblaggio	- Pareti in pannelli autoportanti prefabbricati in terra battuta; - Sistema di fondazione in calcestruzzo leggero - Sistema portante: 70 pilastri prefabbricati in calcestruzzo armato - Sistema di copertura: lastre di calcestruzzo - Pareti prefabbricate in terra battuta - Sistema di fondazione in calcestruzzo alleggerito LC 12/13 - Sistema portante: pilastri prefabbricati in calcestruzzo armato - Sistema di copertura ligneo a due falde	 terra battuta isolamento  terra battuta isolamento terra battuta

	Caratteristiche generali	Materia prima / Filiera
Gaia (IT, 2018)	Edificio sperimentale - Superficie: 20 mq - N piani: 1 - Anno di ultimazione: 2018 - Progettista: Wasp	- Terra locale - stabilizzanti: paglia di riso tritata, lolla di riso, calce idraulica
Tecla (IT, 2021)	Edificio sperimentale - Superficie: 60 mq - N piani: 1 - Anno di ultimazione: 2021 - Progettista: Mario Cucinella / Wasp	- Terra locale - stabilizzanti: Mapesoil 100, Dynamon SR4, Planicrete, PLaniseal WR 100, lolla di riso

Processo produttivo	Sistemi costruttivi	
Stampa 3D  disegno parametrico Stampa 30 m² in 10 giorni, parete monolitica 40 cm 200 ore di stampa, 350 strati, 60 m³ materiale, basso consumo	- Pareti monolitiche stampate con ventilazione naturale integrata (40 cm) - Sistema di fondazioni: soletta in calcestruzzo - Sistema portante: 8 pilastri in legno lamellare - sistema di copertura in - Pareti perimetrali stampate in terra cruda portante. La doppia cupola autoportante garantisce stabilità strutturale; - Sistema di fondazione: in cemento stampato - Sistema di copertura: oblò apribili	 Infill  Infill

Una rilettura crittico-sintetica dei casi studio

l'analisi dei casi studio ha evidenziato come la costruzione in terra cruda stia vivendo una significativa evoluzione, attraverso una transizione da tecniche tradizionali a metodi innovativi che combinano efficienza, sostenibilità e progresso tecnologico. Se un tempo questo materiale era associato esclusivamente a sistemi costruttivi manuali e artigianali, oggi la prefabbricazione e la stampa 3D ne stanno ampliando le potenzialità, rendendolo una soluzione sempre più competitiva nell'ambito dell'architettura sostenibile.

Tuttavia, è fondamentale riconoscere un principio chiave: non esiste un edificio a zero emissioni. Ogni costruzione, indipendentemente dalla tecnica impiegata, ha un impatto ambientale e richiede un certo livello di energia non rinnovabile, sia per l'estrazione delle risorse, sia per la costruzione e la manutenzione nel tempo. Sebbene sia impossibile azzerare completamente le emissioni, l'obiettivo dell'architettura sostenibile è ridurle al minimo, e la terra cruda rappresenta una delle soluzioni più promettenti per raggiungere questo scopo.

Dai casi analizzati emergono tre approcci distinti, ciascuno con vantaggi e criticità:

- La costruzione meccanizzata in situ sfrutta le risorse locali e mantiene un forte legame con la tradizione, ma richiede un alto livello di manodopera qualificata e tempi di realizzazione più lunghi.
- La prefabbricazione garantisce un maggiore controllo della qualità e una riduzione dei tempi di cantiere, ma comporta costi più elevati e una dipendenza dalla logistica per il trasporto dei componenti.
- La stampa 3D rappresenta l'innovazione più avanzata, offrendo rapidità ed efficienza nella costruzione e un uso ottimizzato dei materiali, ma è ancora in fase sperimentale e deve affrontare ostacoli normativi e tecnologici.

Un aspetto comune a tutti i progetti analizzati è l'attenzione alla sostenibilità. L'uso della terra cruda consente di ridurre drasticamente le emissioni di CO₂ legate alla produzione di materiali convenzionali, contribuendo a un'architettura più responsabile e in armonia con l'ambiente. Inoltre, molti edifici realizzati con queste tecnologie sono concepiti per essere completamente riciclabili a fine vita, chiudendo il ciclo della materia in un'ottica di economia circolare.

Tuttavia, nonostante l'impegno nel limitare l'utilizzo di materiali inquinanti e garantire un impatto ambientale ridotto, persiste l'impiego di calcestruzzo e cemento, seppur in quantità minime. Questi materiali sono spesso utilizzati per garantire la stabilità strutturale degli edifici, ad esempio nelle fondazioni o come additivi nella miscela di terra per aumentarne la resistenza. Questo evidenzia come, sebbene la terra cruda rappresenti una valida alternativa sostenibile, siano ancora necessarie ulteriori ricerche per trovare soluzioni completamente prive di materiali ad alto impatto ambientale.

Guardando al futuro, l'integrazione tra tradizione e innovazione sarà determinante per rendere la terra cruda una scelta costruttiva sempre più accessibile. Maggiore ricerca, sviluppo di normative più flessibili e incentivi per materiali naturali potrebbero favorire la sua adozione nel settore edilizio. La combinazione tra nuove tecnologie e antiche conoscenze non solo apre nuove prospettive per l'architettura sostenibile, ma suggerisce un ritorno a materiali più in armonia con l'ambiente, rispondendo così alle esigenze di un'edilizia più consapevole e resiliente.

04

**RISCOPRIRE LE RADICI DELLA TERRA
CRUDA PER GUIDARE L'INNOVAZIONE**

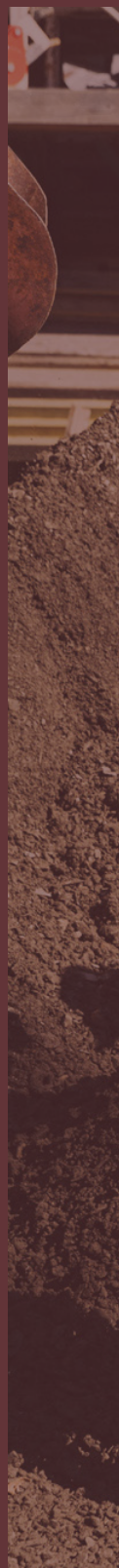




Fig. 145 Immagine tratta da Design Guide for Rammed Earth redatto da ERDEN.
<https://cloud.lehmtonerde.at/index.php/s/mHrRZAJZ52eHced>

4.0 CENNI STORICI

Da quanto emerso fino ad ora è possibile comprendere che la terra cruda rappresenta oggi una delle risposte più promettenti all'urgenza di uno sviluppo sostenibile e di una nuova qualità del costruire. Questo materiale, impiegato senza interruzioni per millenni in gran parte del mondo, continua a essere tra i più diffusi nel settore edilizio globale. Notevoli e ingegnose architetture in terra si rinvengono su tutti i continenti, con una presenza sorprendentemente significativa anche in Europa. Nel corso del tempo, le tecniche tradizionali si sono evolute e razionalizzate con l'ausilio di nuovi strumenti tecnologici: la terra battuta può oggi essere prefabbricata sia on site che off site, tramite grandi moduli murari, i blocchi di adobe possono essere prodotti anche mediante sistemi di stampa avanzata.

In un'epoca in cui l'architettura contemporanea inizia, seppur con ritardo, a riconoscere il proprio imprescindibile ruolo civico ed etico nella lotta alla crisi climatica, la terra cruda si configura come un'opportunità concreta per gli architetti. Il suo utilizzo, infatti, non necessita di combustibili fossili né produce emissioni di CO₂; se impiegata senza cemento o additivi industriali, come spesso raccomandato, si presenta come un materiale completamente riciclabile²⁰³.

Le origini della costruzione in terra cruda risalgono alla Rivoluzione Neolitica²⁰⁴, quando la formazione delle prime comunità agricole rese necessario costruire abitazioni e infrastrutture con materiali locali. In regioni come Anatolia, Mesopotamia ed Egitto, la scarsità di pietra e legno fece della terra il principale materiale da costruzione, impiegato per abitazioni, mura difensive, templi e monumenti, tra cui le ziggurat. A partire dal VII secolo, la civiltà islamica ne diffuse l'uso in un'area geografica vasta, lasciando testimonianze iconiche come l'Alhambra di Granada e i grattacieli in adobe di Shibam nello Yemen, mentre tradizioni affini si sviluppavano in Africa, Asia e Americhe.

Attraverso la cultura islamica e le rotte mediterranee, le tecniche di costruzione in terra cruda si diffusero in Europa. In Spagna, l'eredità costruttiva moresca lasciò tracce evidenti; in Francia, tra il XV e il XIX secolo, il pisé si affermò soprattutto nelle zone rurali e, grazie a François Cointeraux, che nel 1791 pubblicò il *Traité sur la construction des manufactures et maisons de campagne*²⁰⁵, trovò sistematizzazione e diffusione anche in Germania. In Italia, ogni regione sviluppò varianti proprie: pisé e adobe in Piemonte, massone nelle Marche e in Abruzzo, ladiri in Sardegna.

Il declino della terra cruda in Europa si verificò con l'industrializzazione di fine Ottocento, quando materiali moderni soppiantarono le tecniche tradizionali. Tuttavia, in periodi di scarsità, come durante e subito dopo le due guerre mondiali, la terra tornò a essere utilizzata per costruzioni economiche, in particolare in Germania, dove nel 1944 venne adottato il primo codice edilizio specifico (Earth Building Code), poi codificato nella norma DIN 18951 del 1951. Negli anni successivi, la standardizzazione del settore e la diffusione del calcestruzzo

203 Jean Dethier, *Abitare la terra: una nuova storia dell'architettura in terra cruda*, in "The Architectural Review", 31 gennaio 2020, *Abitare la terra: una nuova storia dell'architettura in terra cruda* - The Architectural Review

204 Ibidem

205 Giorgi, Alessandro. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Roma, Aracne, 2014, pag 1.

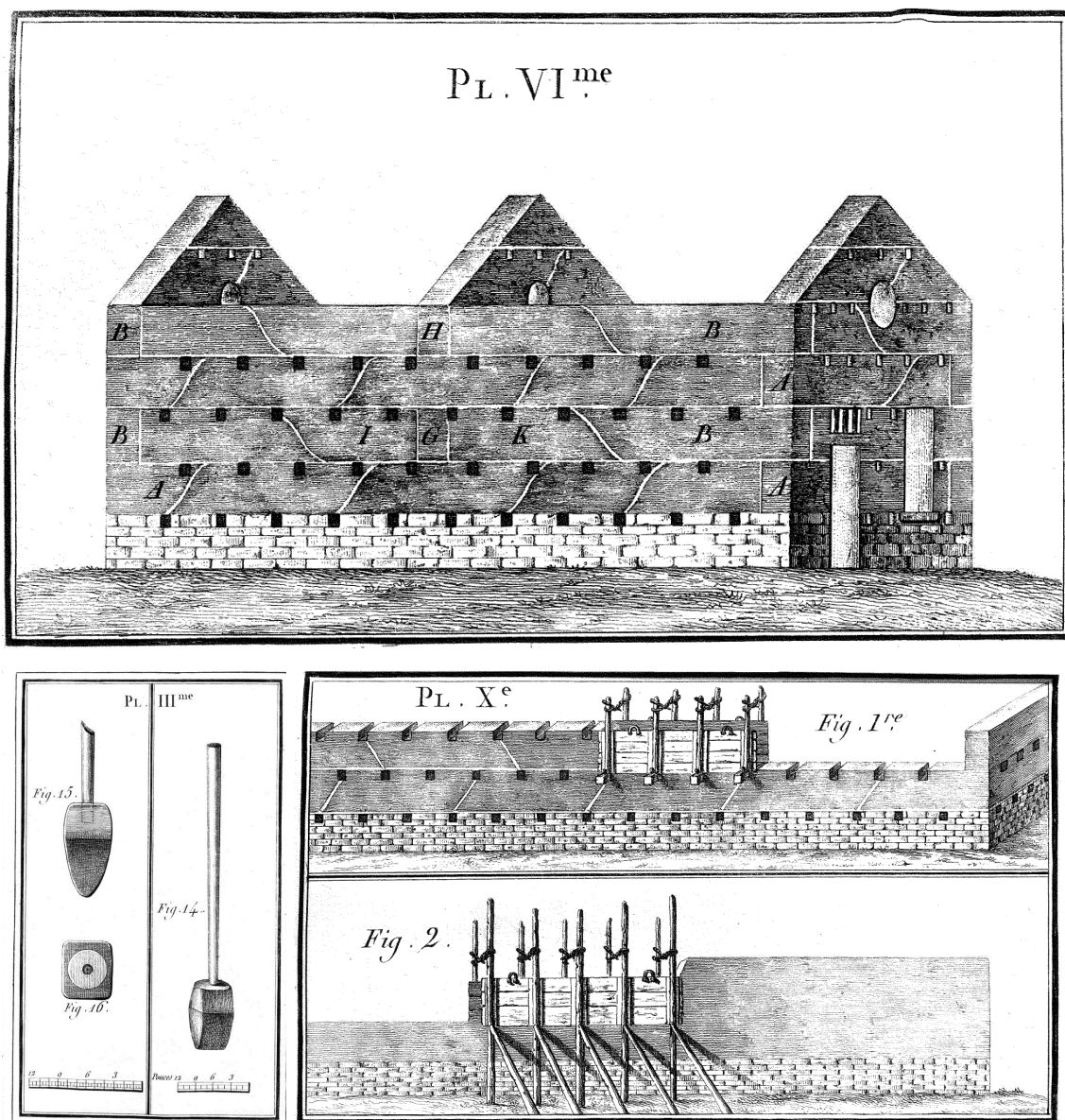


Fig. 146 Tavole di disegno tratte dal libro *Traité sur la construction des manufactures et maisons de campagne*, in cui viene illustrato come costruire in pisé. Fonte: <https://topophile.net/savoir/l-art-du-pise-ou-la-massivation-de-la-terre/>

zo relegarono la terra cruda a materiale marginale, interrompendo anche la trasmissione del sapere pratico tra le generazioni di costruttori.

A partire dagli anni '80, la crescente sensibilità ambientale ha riacceso l'interesse verso questo materiale, non più solo per interventi di restauro, ma come risorsa sostenibile e salutare per l'edilizia contemporanea. La rinascita della costruzione in terra ha trovato due poli principali in Europa: i Länder tedeschi, con la codificazione e l'aggiornamento delle normative, e la Francia, con gruppi come CRAterre e numerose associazioni nazionali impegnate nella formazione e nella divulgazione.

Progetti e ricerche, quali Terra [In]cognita, avviato nel 2007 nell'ambito del Programma Cultura dell'Unione Europea²⁰⁶, hanno contribuito a mappare e valorizzare il patrimonio europeo in terra cruda, promuovendo lo scambio di competenze e il riconoscimento di un'eredità costruttiva ancora viva.

Oggi è sempre più chiaro come l'architettura in terra non sia soltanto un retaggio del passato, ma rappresenti una concreta opportunità per il futuro, grazie ai molteplici vantaggi prestazionali e ambientali che offre²⁰⁷. È pertanto necessario approfondire lo studio di questo materiale, al fine di favorire un impiego consapevole e innovativo per le costruzioni future.

206 *Le case di terra in Europa*, in "CED TERRA", <https://casediterra.com/web/le-case-terra-europa/>

207 Giorgi, Alessandro. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Aracne, Roma, 2014, pag 2

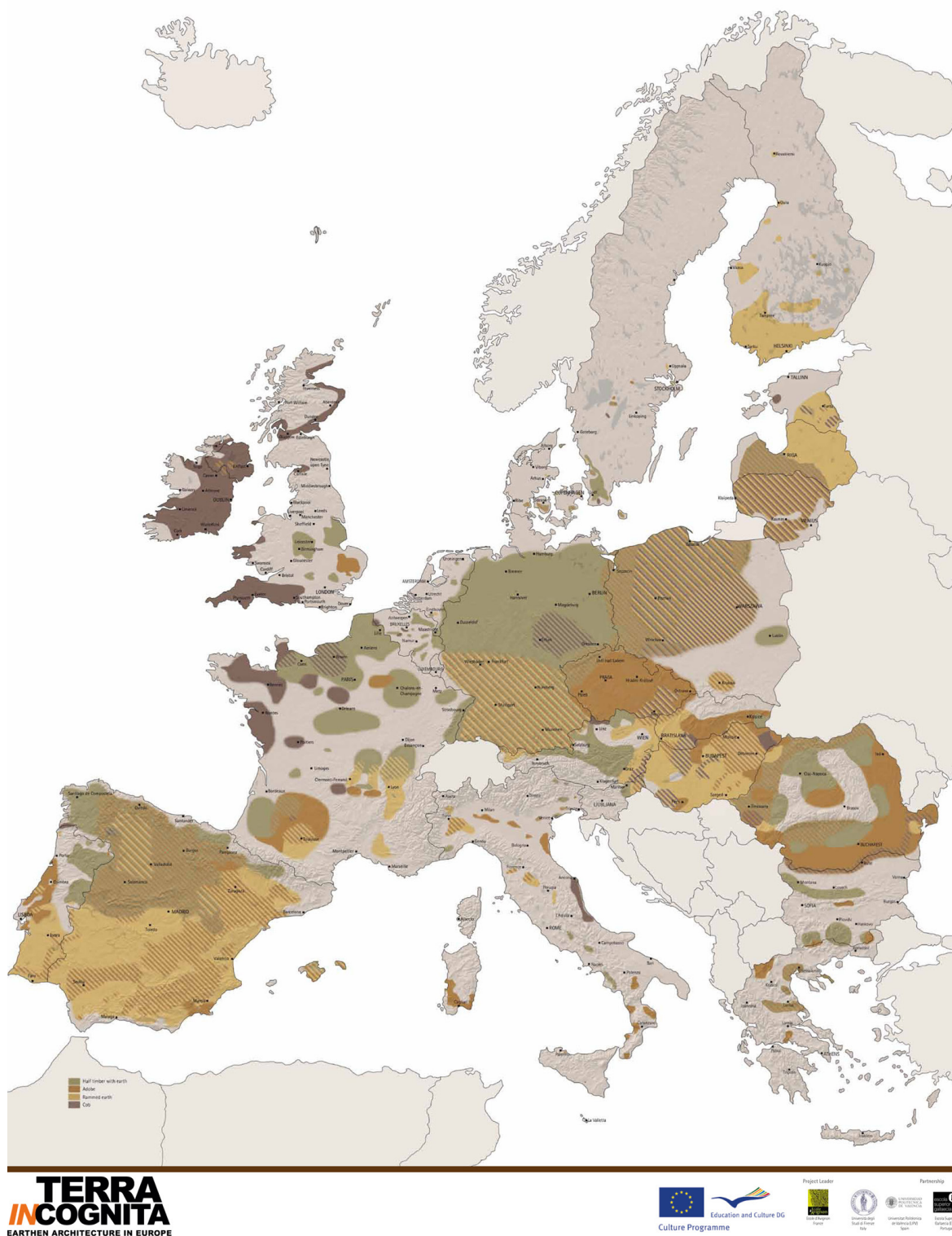


Fig.147 Mappa sul patrimonio architettonico in terra cruda nell'Unione Europea del 2011 rappresenta uno dei principali risultati del progetto di ricerca Terra [In]cognita. Sono state individuate quattro categorie principali per descrivere la ricchezza e la diversità delle tecniche costruttive tradizionali in terra: torchis, adobe, terra battuta e cob. Fonte: Terra Europae – Earthen architecture in the European Union, A.A.V.V., Edizioni ETS, 2011 <https://caseditterra.com/web/le-case-terra-italia/>

4.1 LA TERRA CRUDA: genesi e definizione

La terra è il risultato del processo di erosione delle rocce che compongono la crosta terrestre²⁰⁸. Questo fenomeno avviene principalmente tramite la frantumazione meccanica delle rocce, causata dal movimento dei ghiacciai, dall'azione dell'acqua e del vento, nonché dalle variazioni di temperatura che inducono dilatazione e contrazione delle superfici rocciose. Inoltre, l'acqua che si infiltra nelle fessure e congela contribuisce alla disgregazione delle rocce. Oltre ai processi fisici, le reazioni chimiche indotte dall'acqua e dall'ossigeno, insieme agli acidi organici rilasciati dalle piante, accelerano ulteriormente la trasformazione delle rocce in particelle più fini.

4.1.1 Composizione e proprietà

La terra è un materiale composto da tre fasi distinte: oltre alla parte solida, contiene anche una componente liquida e una gassosa. Queste tre fasi, presenti contemporaneamente, contribuiscono in modo determinante alle proprietà fisico-meccaniche del terreno e sono tutte indispensabili per garantire la sua coesione.

La fase solida è formata da ghiaia, sabbia, limo e argilla. Le proporzioni tra questi elementi possono variare notevolmente e definiscono la granulometria del terreno. Ghiaia e sabbia rappresentano la parte inerte, ossia la componente strutturale del terreno, per entrambi è possibile distinguere tra granulometria grossolana, media o fine, a seconda della grandezza delle particelle.

La ghiaia, con particelle che vanno da 60 a 2 mm di diametro, compone lo scheletro del terreno e contribuisce a controllare i fenomeni di ritiro e capillarità nel terreno.

La sabbia, composta di quarzo e silicio, ha particelle tra 2 mm e 0,06 mm e conferisce permeabilità al terreno²⁰⁹. Il limo, formato da minerali stabili, ha particelle comprese tra 0,06 e 0,002 mm, è permeabile all'acqua e svolge una funzione fondamentale nella coesione del materiale.

Le argille, idrati allumino-silicosi, si presentano come particelle microscopiche e submicroscopiche a forma lamellare, con uno spessore inferiore a 0,002 mm, e svolgono la funzione di legante all'interno del terreno, proprio come il cemento nel calcestruzzo. La sua percentuale determina il comportamento del materiale: un contenuto inferiore al 15% classifica il suolo come magro, mentre una quantità superiore al 30% lo rende ricco di argilla. Tuttavia, nella costruzione in terra, questa classificazione è meno rigida: un terreno con il 14% di argilla può già essere considerato adeguato, a seconda delle tecniche costruttive adottate.

Quando il contenuto di argilla è particolarmente elevato, è necessario bilanciare la miscela con l'aggiunta di sabbia o fibre vegetali (come la paglia), per migliorarne la lavorabilità e la stabilità.

208 S. Hannah, *Building with earth*, Dachverband Lehm e.V., July 2004, Weimar Germany, pag.3. <https://www.dachverband-lehm.de/>

209 Bollini G., *Terra battuta: tecnica costruttiva e recupero, linee guida per le procedure d'intervento*, Edicom Edizioni, Monfalcone (Gorizia), 2013, pag. 22. <https://www.edicomstore.it/vetrina/terra-battuta-tecnica-costruttiva-recupero/>

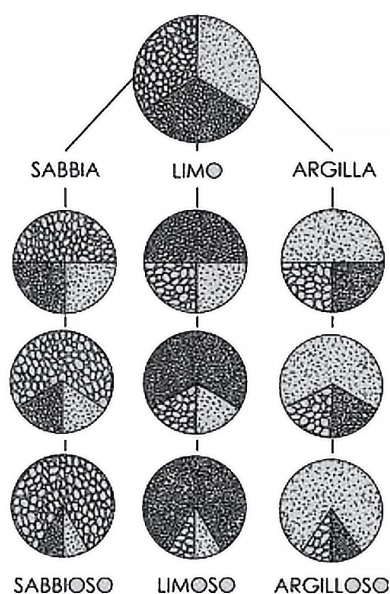


Fig. 148 Rappresentazione strutturale del terreno secondo la sua composizione. Fonte: Bollini G., *Terra battuta: tecnica costruttiva e recupero, linee guida per le procedure d'intervento*, Edicom Edizioni, Monfalcone (Gorizia), 2013, pag. 24.

<https://www.edicomstore.it/vetrina/terra-battuta-tecnica-costruttiva-recupero/>

La struttura granulare del terreno lascia spazio a dei vuoti che possono essere occupati, in proporzioni diverse e in base al grado di umidità, da aria (componente gassosa) o acqua (componente liquida). La distribuzione di queste fasi influisce direttamente sulla struttura del terreno e, quindi, sulle sue proprietà fisico-meccaniche.

L'utilizzo della terra in edilizia richiede una selezione accurata del materiale. Solitamente, si utilizza il terreno estratto a 20-30 cm di profondità²¹⁰, evitando lo strato superficiale, ricco di humus, che deriva dalla decomposizione di materiale vegetale, tende ad acidificare il terreno e può comprometterne la stabilità strutturale.

L'acqua rappresenta un elemento chiave nel comportamento della terra cruda, poiché attiva le forze leganti dell'argilla²¹¹. Quando la terra cruda si asciuga, l'argilla forma una rete di legami che conferisce resistenza alla compressione e alla trazione. Questo processo è determinante nella costruzione in terra, poiché influisce sulla durabilità e sulla stabilità delle strutture.

La porosità²¹² della terra è un altro fattore cruciale: un'elevata porosità favorisce la traspirazione del vapore, contribuendo alla regolazione dell'umidità interna degli edifici, e migliora la resistenza al gelo, prevenendo la formazione di crepe dovute alla dilatazione dell'acqua

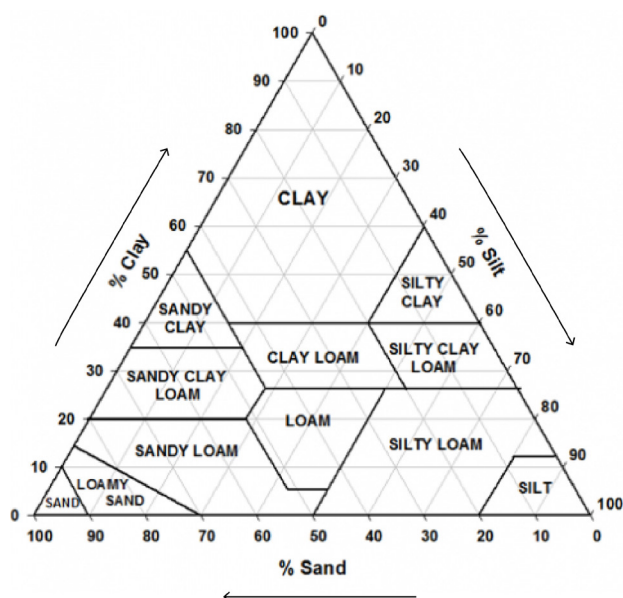


Fig. 149 Triangolo delle tessiture del terreno con le 12 principali classi tessiturali.

Fonte: <https://www.alfatest.it/determinare-la-tessitura-dei-terreni-con-la-granulometria-a-diffrazione-laser/>

210 Scudo, Gianni et al. *Costruire con la terra: tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2001, pag. 9.

211 Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Third and revised edition. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013, pag 21.

212 Ibidem.

congelata nei pori del materiale.

Un altro parametro fondamentale è la superficie specifica²¹³, ovvero la somma di tutte le superfici delle particelle che compongono la terra. Maggiore è la superficie specifica, più elevata è la coesione del materiale.

Anche la densità del suolo può variare in funzione del grado di compattazione:

- Terra appena scavata: 1000-1500 kg/m³
- Terra compressa (terra battuta, adobe): 1700-2200 kg/m³, o più se sono presenti alte percentuali di ghiaia

La capacità di compattazione²¹⁴ è un altro parametro essenziale nella costruzione in terra, poiché influisce sulla stabilità della struttura.

Per ottenere una compattazione ottimale, è necessario raggiungere il contenuto d'acqua ideale, noto come "contenuto d'acqua ottimale", che permette alle particelle di disporsi più densamente con il minimo attrito ed è determinato attraverso il test di Proctor²¹⁵.

Questi elementi forniscono una base essenziale per comprendere il comportamento della terra come materiale da costruzione, evidenziando come la sua composizione, la presenza di acqua e la granulometria influiscano sulle proprietà meccaniche e sulla durabilità delle strutture realizzate con tecniche tradizionali e moderne.

4.1.2 Distribuzione dei grani

La terra è composta da grani che interagiscono tra loro sia dal punto di vista meccanico che chimico. Questi grani si dividono in due categorie principali: quelli inerti e quelli attivi²¹⁶.

I grani inerti hanno dimensioni superiori ai 10 micron e sono costituiti da frammenti di roccia che possono presentare forme più o meno sferiche, a seconda della loro età e dell'azione esercitata su di essi dagli agenti atmosferici nel tempo. La loro funzione è puramente strutturale: non reagiscono chimicamente, ma contribuiscono a dare forma e resistenza al terreno attraverso le forze di massa.

213 Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Third and revised edition. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013, pag 21

214 Ibidem.

215 Il test prevede la compattazione di strati di terreno inseriti in uno stampo cilindrico, utilizzando un pestello che cade liberamente dall'alto. L'energia applicata alla compattazione può essere modificata variando il peso del pestello, l'altezza da cui cade, il numero di colpi per ciascuno strato o lo spessore degli strati stessi. Lo scopo della prova è determinare la correlazione tra il contenuto d'acqua e la densità del terreno quando viene sottoposto a una forza di compattazione definita secondo uno standard.

Fonte: Diego Barbero, *Prova di compattazione Proctor: che cos'è e quando richiederla*, in "Studio geologico e geotecnico", 14 agosto 2019. <https://geologobarbero.it/prova-di-compattazione-proctor-che-cos-e-quando-richiederla/>

216 P. Roberto, *Tecnologie per il recupero di costruzioni in terra battuta in Piemonte*, in "Doctoral thesis Polito", 2015, pag. 10. <https://iris.polito.it/handle/11583/2616409>

TERRE INCOERENTI GRANA GROSSA						TERRE COESIVE GRANA FINE		
CIOTTOLI (mm)	GHIAIA (mm)			SABBIA (mm)			LIMO (mm)	ARGILLA (mm)
> 60	grossa	media	fine	grossa	media	fine		
	60- 20	20- 6	6-2	2,0 - 6,0	0,6 - 0,2	0,2 - 0,06	0,06 - 0,002	< 0,002

Fig. 150 Tabella di distribuzione della granulometria che compone la terra.

Fonte: Bollini G., *Terra battuta: tecnica costruttiva e recupero, linee guida per le procedure d'intervento*, Edicom Edizioni, Monfalcone (Gorizia), 2013, pag. 22. <https://www.edicomstore.it/vetrina/terra-battuta-tecnica-costruttiva/>

Questi grani rappresentano lo scheletro del terreno e la loro presenza, in proporzioni diverse, influenza alcune proprietà fondamentali del materiale. Ad esempio, una buona quantità di sabbia può aiutare a contenere i fenomeni di ritiro e fessurazione durante l'essiccazione dei manufatti in terra. È però importante che la dimensione di questi grani sia compatibile con lo spessore degli elementi edilizi che si vogliono realizzare: se troppo grandi, possono compromettere l'uniformità della miscela, soprattutto nei componenti più sottili.

I grani attivi, invece, sono molto più piccoli, dell'ordine di pochi micron, e si presentano generalmente sotto forma di sottili lamelle. Sono quelli che interagiscono maggiormente con i liquidi e i gas presenti all'interno del terreno. A differenza degli inerti, questi grani partecipano attivamente alla coesione del materiale, sia grazie alle forze di massa che per effetto delle caratteristiche superficiali delle particelle. Il componente attivo per eccellenza è l'argilla, che funge da vero e proprio legante. Le sue particelle si dispongono in strati sottili e paralleli, tra i quali l'acqua occupa gli spazi interstiziali, permettendo alle lamelle di scorrere tra loro e conferendo plasticità al composto. Regolando la quantità d'acqua, la terra può quindi passare da uno stato solido a uno plastico o liquido. Questi passaggi sono esclusivamente fisici, quindi totalmente reversibili.

La struttura del terreno dipende dalla forma, dalle dimensioni e dalla disposizione spaziale dei suoi grani. In base a queste caratteristiche, si distinguono tre tipologie principali: • I terreni granulari, come quelli ricchi di ghiaia, in cui l'argilla ha un ruolo minimo e che, per via della scarsa coesione, non sono adatti alla costruzione.

- I terreni a struttura frammentata, dove sabbia e ghiaia sono tenute insieme da piccoli agglomerati di argilla, ma presentano ancora diversi vuoti tra i componenti.
- I terreni a struttura continua, compatti e omogenei, in cui i grani inerti sono ben distribuiti e legati da una miscela uniforme di argilla e limo²¹⁷.

Un altro aspetto fondamentale è la tessitura del terreno, cioè la proporzione tra le varie componenti presenti. Essa incide direttamente sulle caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale, fornendo indicazioni utili per i suoi possibili impieghi. Terreni ricchi di sabbia o limo, ad esempio, tendono ad avere una bassa coesione, ma sono meno soggetti a deformazioni e fessurazioni causate dal ritiro durante l'essiccazione. Al contrario, i terreni con un'alta percentuale di argilla presentano una forte coesione e plasticità, ma possono essere molto sensibili al ritiro, il che li rende più inclini a fessurarsi, a seconda anche del

²¹⁷ Bollini G., *Terra battuta: tecnica costruttiva e recupero, linee guida per le procedure d'intervento*, Edicom Edizioni, Monfalcone (Gorizia), 2013, pag. 24. <https://www.edicomstore.it/vetrina/terra-battuta-tecnica-costruttiva-recupero/>

tipo di argilla presente.

Infine, la distribuzione granulometrica e la composizione della miscela sono elementi chiave per determinare quali tecniche costruttive siano più adatte a un determinato terreno. A questo scopo, si possono effettuare varie prove per valutarne le caratteristiche. Queste analisi possono essere svolte in laboratorio, per ottenere risultati più precisi, ma esistono anche test semplici e pratici che possono essere eseguiti direttamente in cantiere. Questi ultimi sono particolarmente utili in contesti di autocostruzione o quando non si ha accesso a strutture scientifiche.

4.1.3 Test per analizzare la composizione della terra:

Per valutare l'idoneità di una miscela di terra in una specifica applicazione, è essenziale conoscerne la composizione. Esistono diversi metodi di analisi, che spaziano dai test di laboratorio più precisi ai semplici test sul campo, utili per una valutazione rapida direttamente in cantiere²¹⁸.

Per determinare la granulometria della terra si usano principalmente due metodi: la setacciatura e la sedimentazione.

La setacciatura serve a separare e quantificare le particelle più grosse, come sabbia, ghiaia e pietre. La sedimentazione, invece, permette di analizzare la parte più fine del terreno, cioè limo e argilla, seguendo la normativa tedesca DIN 18123. Questo metodo si basa sul tempo di sedimentazione delle particelle in acqua.

La quantità di acqua nella terra è un parametro fondamentale perché influisce sulla sua lavorabilità. Per misurarla si pesa un campione, lo si essicca in forno a 105°C fino a peso costante e si calcola la differenza rispetto al peso iniziale. Questa differenza rappresenta l'acqua presente, espressa in percentuale rispetto al materiale secco.

Seppur meno precisi rispetto ai test di laboratorio, i test sul campo consentono di ottenere un'indicazione immediata sulla composizione della terra direttamente sul posto. I principali test eseguibili sul campo sono:

- Test dell'odore: la terra pura è inodore. Se emanasse un odore di muffa, potrebbe contenere humus o materia organica in decomposizione, rendendola inadatta alla costruzione;
- Test del gusto (Nibble test): assaggiando un piccolo campione si può percepire la consistenza. Se è ruvido e graffiante è ricca di sabbia; se è più fine ma non liscia, predomina il limo; se è liscia e appiccicosa, contiene molta argilla;
- Test del lavaggio: strofinando la terra umida tra le mani si può capire la composizione. Se si sentono i granuli è sabbiosa o ghiaiosa; se è appiccicosa ma si pulisce facilmente da asciutta, è limosa; se rimane molto appiccicosa e serve acqua per pulirla, è argillosa;

218 Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Third and revised edition. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013, pag 19.

- Test del taglio: facendo una palla con terra umida e tagliandola con un coltello, la superficie lucida indica molto argilla, mentre quella opaca segnala più limo;
- Test della sedimentazione: si mette terra e acqua in un barattolo, si agita e si lascia sedimentare. Le particelle più grandi si depositano prima, quelle più piccole restano in sospensione. Tuttavia, secondo studi dell'Università di Kassel, questo metodo può avere errori molto elevati.

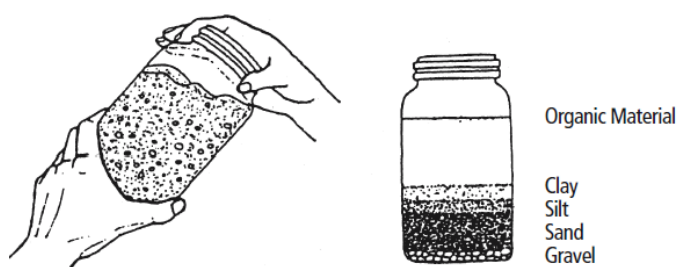


Fig. 151 Rappresentazione del test della sedimentazione. Fonte: Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Third and revised edition.* Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013, pag. 22

Test della resistenza e coesione permettono di valutare la qualità della terra per la costruzione in base alla sua capacità di mantenere la forma e resistere alla compressione. Questi sono:

- Test della palla (Ball dropping test): si forma una palla di terra di circa 4 cm e la si lascia cadere da 1,5 metri su una superficie dura. Se si appiattisce leggermente con poche crepe, la terra ha abbastanza argilla (ma potrebbe servire un po' di sabbia); se si sgretola completamente, è povera di argilla e non adatta; se resta compatta con qualche crepa, è idonea per tecniche come adobe o terra battuta;
- Test della consistenza: si arrotola una pallina di terra umida fino a formare un filo sottile di 3 mm. Se si spezza prima, la terra è troppo secca o con poca argilla; se non si riesce a formare il filo, è troppo sabbiosa; se il filo è troppo compatto e difficile da spezzare, c'è troppa argilla e va bilanciata con sabbia;
- Test della coesione (Ribbon test): si schiaccia un cilindro di terra fino a formare un nastro sottile e si verifica quanto si riesce a stenderlo prima che si rompa. Se si spezza dopo circa 20 cm, c'è troppa argilla; se si rompe subito, c'è poca argilla e potrebbe essere necessario aggiungerne.



Fig. 152 Immagine del dropping test. Fonte: Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Third and revised edition.* Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013, pag. 23

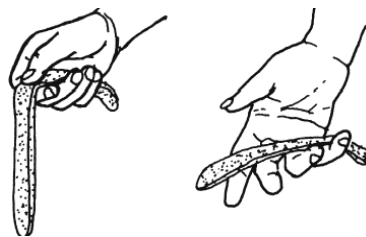


Fig. 152 Rappresentazione del ribbon test. Fonte: Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Third and revised edition.* Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013, pag. 24

Alcune caratteristiche chimiche influenzano l'idoneità della terra in edilizia, ad esempio il contenuto di calce. Per verificarlo si usa il test dell'acidità: si versa una soluzione di acido cloridrico al 20% sulla terra; se si nota una forte effervescenza, significa che la calce supera il 5%, e il terreno potrebbe non essere adatto per la costruzione con terra cruda.

4.1.4 Tecniche di costruzione tradizionali

La costruzione in terra presenta un vasto panorama di tecniche costruttive tradizionali, tra cui la terra compressa, estrusa e colata, ciascuna con specifiche caratteristiche esecutive, prestazionali e culturali differenti.

Dal punto di vista strutturale, queste tecniche si possono suddividere in tre grandi categorie²¹⁹ :

- Tecniche monolitiche portanti, con cui si realizzano elementi strutturali continui, come le pareti in terra battuta.
- Tecniche a blocchi, che prevedono l'assemblaggio di elementi modulari, con funzione sia portante sia di tamponamento, come nel caso dei mattoni in adobe o dei blocchi CEB.
- Tecniche di tamponamento non portanti, generalmente associate a strutture a telaio in legno, utilizzate per la chiusura e la protezione degli spazi interni.
- Anche in termini di processo costruttivo si possono distinguere due approcci principali:
- Le tecniche "a bagnato", che prevedono la messa in opera diretta di impasti umidi all'interno di casseri (similmente al calcestruzzo).
- Le tecniche "a secco", che invece implicano la produzione degli elementi costruttivi fuori opera, con successivo montaggio in cantiere.

Le tre tecniche più diffuse per la realizzazione di murature portanti sono: l'adobe, costituito da mattoni modulari essiccati al sole; la terra battuta, ottenuta comprimendo la terra all'interno di casseforme laterali per creare muri monolitici, spesso dello spessore di circa 50 cm; e la sua variante in pannocchia, che viene applicata senza cassaforma. Oltre alla realizzazione di pareti, l'adobe si presta anche alla costruzione di archi, volte e cupole di varie dimensioni.

²¹⁹ Scudo, Gianni et al. Costruire con la terra: tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni. Napoli: Sistemi Editoriali, 2001, pag. 10.

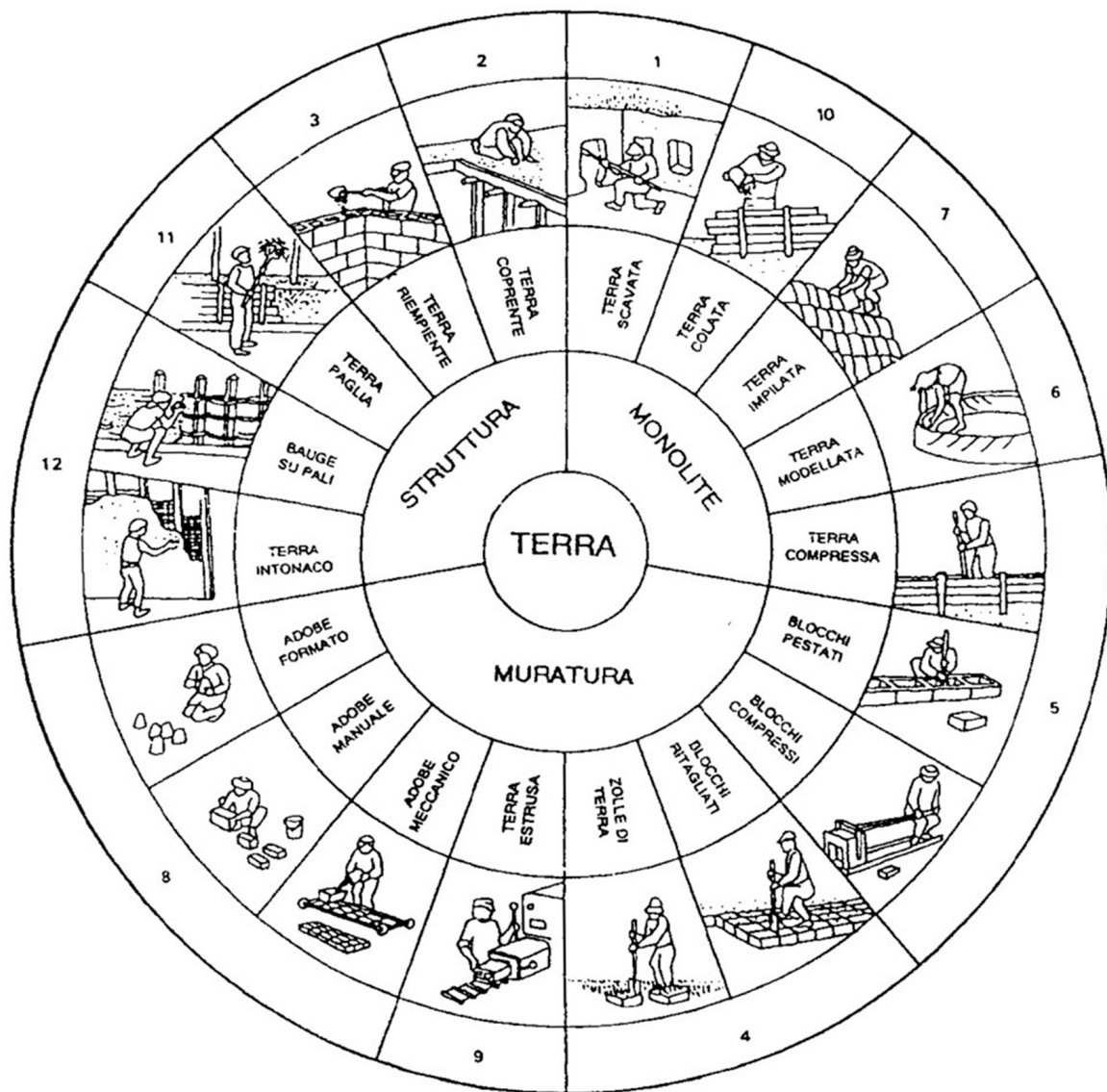


Fig. 153 La ruota delle tecniche costruttive è stata ideata dal CRAterre e pubblicata per la prima volta nel 1989 nel volume "Traité de construction en terre crue". Questo strumento offre una panoramica sintetica delle principali tecniche di costruzione in terra cruda, evidenziando la ricchezza di varianti che si sono sviluppate nel tempo. Ogni variante riflette l'identità specifica dei territori e delle culture che l'hanno generata.

Fonte: <https://architetturedallaterra.it/tecniche-costruttive-in-crudo-dalla-tradizione-allinnovazione/>

4.1.4.1 Il patrimonio costruito in terra battuta in Piemonte

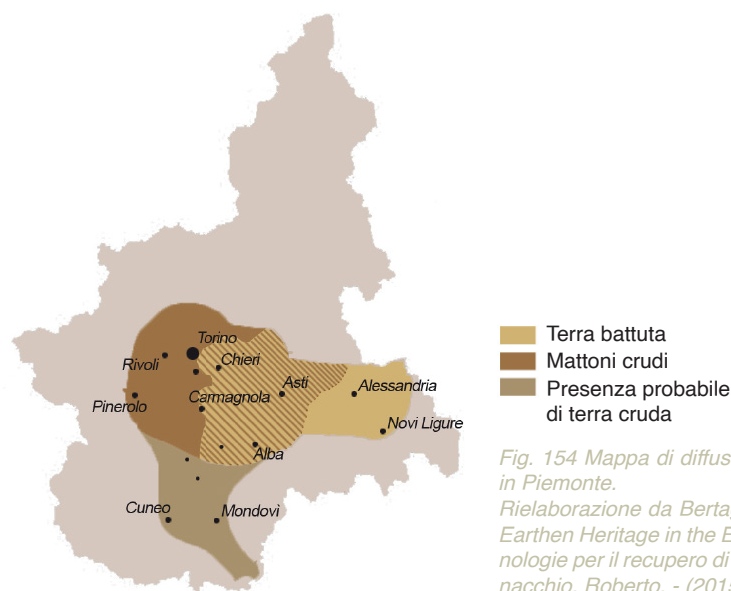


Fig. 154 Mappa di diffusione delle tecniche costruttive in terra cruda in Piemonte.
Rielaborazione da Bertagnin 1999, p. 82; Bosia 2006, p. 28; Map of Earthen Heritage in the European Union 2011, Terra Incognita, in Tecnologie per il recupero di costruzioni in terra battuta in Piemonte, Penacchio, Roberto. - (2015). [10.6092/polito/porto/2616409], pag 34

In Italia, il patrimonio architettonico in terra battuta presenta una distribuzione disomogenea, con aree in cui tale tradizione costruttiva risulta ancora attestata e, in alcuni casi, operativa. In Piemonte, la sua presenza è documentata prevalentemente nei settori meridionali della regione, in corrispondenza della fascia di transizione geologica tra l'Appennino Ligure e la pianura del Novese e dell'Alessandrino. La tecnica, basata sull'impiego di casseforme lignee per la realizzazione di murature monolitiche mediante compattazione della terra all'interno degli stampi, ha trovato applicazione tanto nell'edilizia rurale quanto in edifici residenziali caratterizzati da un apprezzabile livello qualitativo. Mentre queste ultime tipologie hanno suscitato l'interesse della ricerca e degli organismi preposti alla tutela, le forme edilizie più modeste, strettamente legate al contesto agricolo, in particolare quelle diffuse nelle colline dell'Astigiano, sono rimaste a lungo marginalizzate, pur costituendo una testimonianza autentica e tuttora riconoscibile nelle componenti rustiche di numerosi manufatti agricoli²²⁰.

La tecnica costruttiva prevedeva l'impiego di argilla locale, spesso trasportata in cantiere da giacimenti non immediatamente prossimi, ma comunque diffusi, soprattutto nella collina torinese. Sabbia e ghiaia erano normalmente raccolte dai torrenti, mentre la terra di scavo, talvolta marnosa e contenente detriti eterogenei, veniva lavorata per migliorarne la qualità: immersa in vasche piene d'acqua, veniva lasciata riposare per permettere la separazione degli elementi organici e ottenere un impasto omogeneo, adatto alla miscelazione. Ne risultava un materiale assimilabile a un "calcestruzzo di terra"²²¹. Le fondazioni erano spesso in blocchi di arenaria, materiale abbondante nel sottosuolo collinare torinese, dove si trovano lastroni regolari di spessore compreso tra i 10 e i 25 cm, alternati a marne più o meno scistose. Nelle porzioni inferiori delle murature, all'interno della terra compressa, venivano

220 Scudo, Gianni et al. *Costruire con la terra: tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2001, pag. 10.

221 Anna Gilibert, Roberto Mattone, *Terra: incipit vita nova – L'architettura di terra dalle origini al presente*, Torino, Castello del Valentino, 16-14 aprile 1997, pp. 7-8

frequentemente inglobati ciottoli scuri di fiume, per trattenere l'umidità²²².

La costruzione delle murature seguiva un metodo sistematico e uniforme, in strati orizzontali sovrapposti, determinati dall'altezza delle casseforme, (circa 130 cm). La terra, miscelata con inerti e ben compattata, veniva trasportata in ceste e versata all'interno delle casseforme, e compressa con strumenti specifici come la "damigella" o i pestelli. Superata una certa altezza (circa 250 cm), le ceste venivano issate tramite una carrucola fissata a una piantana, manovrata da un operaio che, utilizzando la propria forza come contrappeso, permetteva di sollevare il materiale. Le casseforme, identiche per i muri esterni e interni, venivano mantenute rigide e parallele grazie a distanziali sporgenti, che permettevano anche il loro agevole sollevamento tramite carrucola.

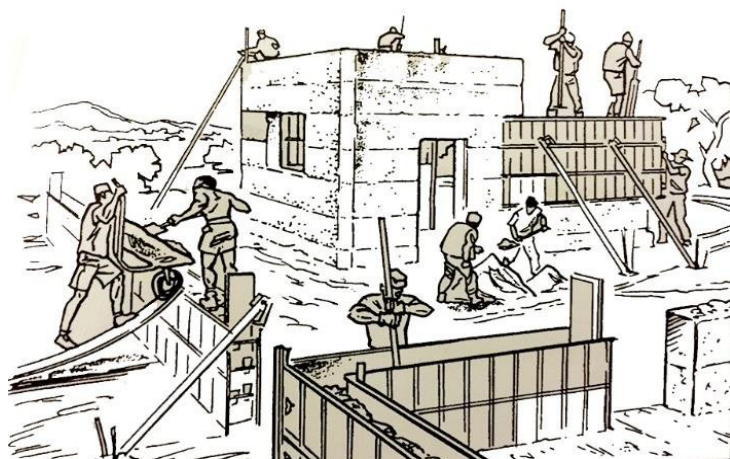


Fig. 155 Rappresentazione schematica del processo di costruzione in pisè. Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Diagram-from-the-code-of-practice-showing-division-of-labour-in-a-group_fig5_355047522

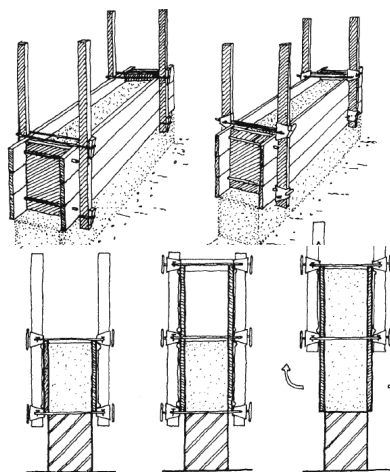


Fig. 156 Sistema di cassetteria. Fonte: Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Third and revised edition. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013, pag. 53

La tipologia edilizia presente nell'Alessandrino risulta del tutto analoga a quella delle aree collinari²²³, con soluzioni simili per solai e coperture.

I pavimenti erano in piastrelle di cotto, mentre le strutture orizzontali, inizialmente in legno, furono poi sostituite da volte in mattoni pieni, a botte ribassata o a padiglione, realizzate senza centine ma con sabbia modellata e tavole coperte da un telo. Il consolidamento avveniva con colate di gesso liquido. In alternativa, si usavano voltine tra travi parallele (interasse 1 m), con travi orizzontali in ciliegio selvatico o robinia su cui poggiavano i travetti²²⁴.

Le aperture nelle murature, seppur di dimensioni contenute, erano numerose. Le murature esterne, originariamente prive di intonaco, erano protette dagli agenti atmosferici tramite aggetti dei tetti. L'azione degli agenti atmosferici, soprattutto pioggia e vento, provocava una progressiva erosione superficiale che tuttavia tendeva a stabilizzarsi nel tempo. Solo in epoche successive si cominciò a utilizzare intonaci specifici per proteggere le superfici²²⁵.

222 Anna Gilbert, Roberto Mattone, *Terra: incipit vita nova – L'architettura di terra dalle origini al presente*, Torino, Castello del Valentino, 16-1 aprile 1997, pp. 7-8

223 Ibidem.

224 Ibidem, p. 7-8

225 Ibidem.

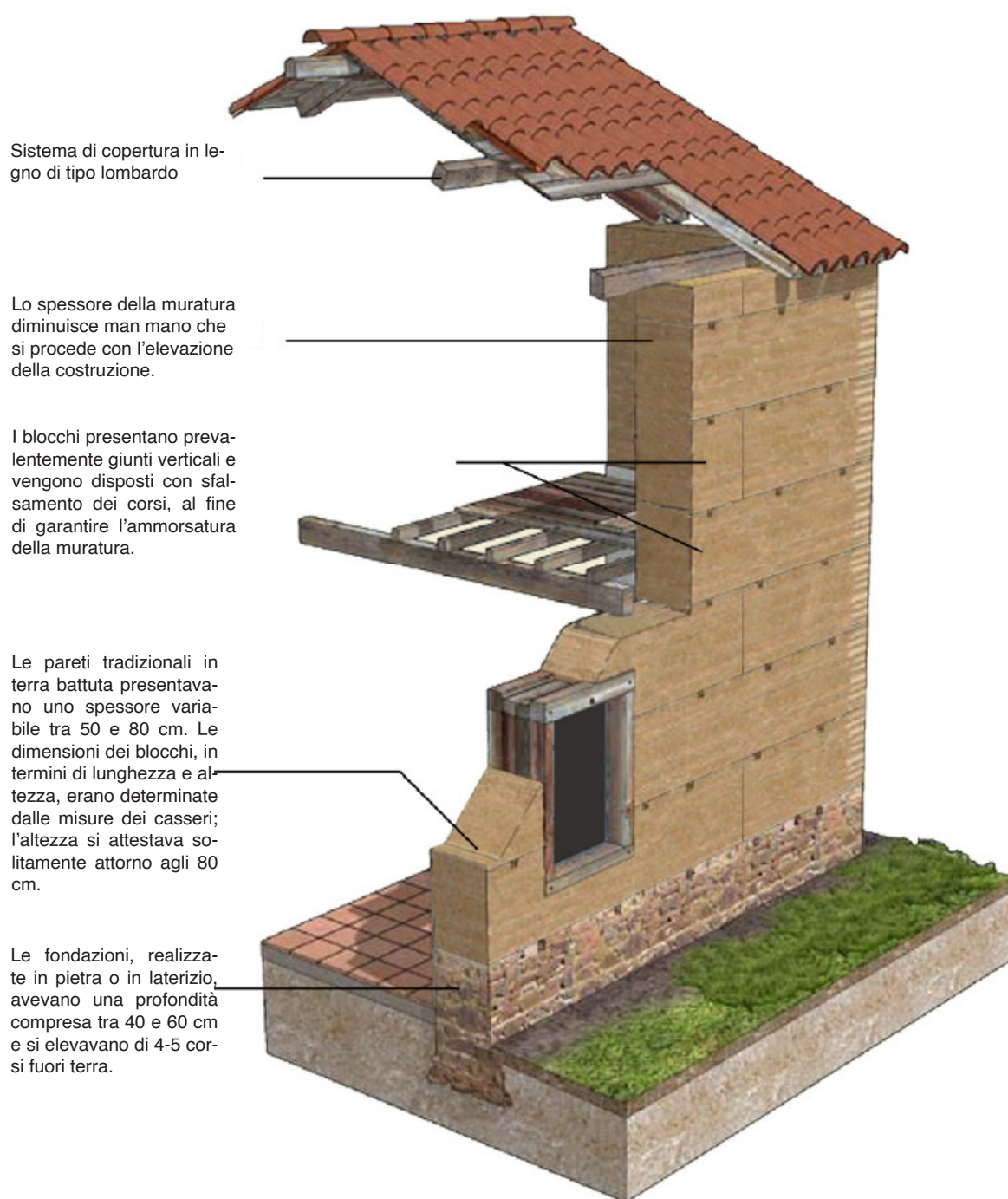


Fig. 157 La figura illustra le dimensioni di alcuni elementi tecnologici comunemente impiegati nella costruzione in terra battuta in Piemonte. Fonte: P. Roberto, *Tecnologie per il recupero di costruzioni in terra battuta in Piemonte*, in "Doctoral thesis Polito", 2015, pag. 38. <https://iris.polito.it/handle/11583/2616409>

I fattori di degrado: umidità e manutenzione

Il degrado degli edifici in terra cruda è causato in primo luogo all'umidità, al deterioramento del legno e ad agenti esterni accidentali. Le murature venivano lasciate a stagionare per almeno sei mesi prima della messa in opera, per consentire l'eliminazione dell'umidità in eccesso. Tuttavia, un certo grado di umidità residua è necessario affinché il materiale mantenga compattezza e resistenza. La mancata manutenzione è uno dei principali fattori di degrado: gli intonaci in terra, infatti, necessitano di rinnovo annuale, poiché l'azione degli agenti atmosferici può provocarne il distacco e la formazione di sacche d'umidità nascoste tra intonaco e muratura. Una corretta manutenzione, quindi, deve prevedere sia l'efficienza delle coperture sia la regolare sostituzione degli intonaci, che consente anche l'ispezione dello stato delle murature²²⁶.

Altro aspetto critico è l'umidità ascendente, causata dalla carenza di fondazioni profonde e dalla frequente assenza di cantine, che impedirebbero la formazione di ambienti umidi a diretto contatto con la struttura. L'umidità risale per capillarità, portando con sé i sali presenti nel terreno. Quando l'acqua evapora, i sali cristallizzano e aumentano di volume, causando tensioni nei pori del materiale, che portano a fratture e disgregazioni. L'argilla, una volta imbibita, si rigonfia e forma una barriera che ferma la risalita, ma solo a una certa altezza (tra 50 e 80 cm), provocando una linea orizzontale di degrado nelle murature e negli intonaci. Per evitare tali problemi, si ricorreva a una base in pietra posata a secco, con funzione drenante, e si adottavano accorgimenti per evitare il ristagno d'acqua vicino alle fondazioni, soprattutto durante lo scioglimento della neve²²⁷.

I restauri degli edifici in terra cruda devono mirare al ripristino dell'equilibrio igrometrico originario tra materiali e ambiente. È fondamentale riprendere le pratiche di manutenzione ordinaria, rispettando le funzioni e i ritmi della costruzione. Gli intonaci, ad esempio, devono essere realizzati con materiali coerenti con quelli storici, come malte terrose o argillose contenenti fanghiglia locale, sabbia, fibre vegetali, proteine animali, oppure malte miste con aggiunta di calce o gesso, particolarmente abbondante nell'Astigiano. L'intonaco funge da superficie di sacrificio e deve essere periodicamente sostituito. Altrettanto importante è la prevenzione del ristagno idrico, la protezione dalle escursioni termiche, dal vento e dalla gelività, che possono favorire anche la diffusione di microrganismi biodeteriogeni come funghi e licheni²²⁸.

La complessità dei fattori coinvolti nel degrado e nel restauro di edifici in terra cruda impone un approccio attento e multidisciplinare. La loro conservazione richiede conoscenze tecniche specifiche, ma anche la riscoperta di una cultura costruttiva che, sebbene povera nei materiali, risulta ricca di soluzioni intelligenti e sostenibili.

226 Anna Gilibert, Roberto Mattone, *Terra: incipit vita nova – L'architettura di terra dalle origini al presente*, Torino, Castello del Valentino, 16-1 aprile 1997, p. 13.

227 Ibidem.

228 Anna Gilibert, Roberto Mattone, *Terra: incipit vita nova – L'architettura di terra dalle origini al presente*, Torino, Castello del Valentino, 16-1 aprile 1997, p. 14.

4.1.5 Caratteristiche meccaniche e affidabilità strutturale delle costruzioni in terra cruda

Per garantire la sicurezza strutturale di un edificio, il progettista deve conoscere le proprietà meccaniche del materiale impiegato e basarsi su un modello che descriva in modo attendibile il comportamento dell'intera struttura. Sebbene le conoscenze scientifiche sulle costruzioni in terra cruda non siano ancora del tutto consolidate, per alcune tecniche costruttive è possibile utilizzare, almeno in prima approssimazione, strumenti di analisi mutuati dallo studio delle murature tradizionali²²⁹. Tuttavia, poiché la composizione della terra varia da luogo a luogo, è necessario procedere di volta in volta con prove sperimentali specifiche per ottenere i valori dei parametri meccanici rilevanti.

È necessario chiarire che non tutte le terre sono adatte alla costruzione: solo quelle con determinate caratteristiche mineralogiche e una composizione percentuale ben definita possono essere impiegate in ambito edilizio. In generale, la terra è da considerarsi un materiale "povero", poiché presenta prestazioni meccaniche inferiori rispetto ad altri materiali da costruzione. Ciò la colloca all'ultimo posto nella scala dei materiali per capacità portante²³⁰. Le sue proprietà dipendono da molteplici fattori, tra cui la composizione chimico-fisica, il contenuto d'acqua, la granulometria degli inerti e il grado di compattazione con cui vengono realizzati gli elementi costruttivi, come i blocchi in adobe o i muri in pisè.

Nel valutare il comportamento strutturale, è fondamentale tenere conto della resistenza a compressione e delle caratteristiche deformative: la terra, come tutti i materiali lapidei, ha buona resistenza alla compressione ma scarsa a trazione, al punto che quest'ultima viene normalmente esclusa dai calcoli strutturali²³¹. Un altro aspetto da considerare è la durabilità del materiale, spesso minacciata dalle acque meteoriche e da quelle di risalita capillare, che impongono l'adozione di specifiche tecniche di stabilizzazione.

Le prestazioni di una costruzione in terra cruda devono essere valutate su più livelli: meccanico, ossia la capacità di resistere a carichi statici e dinamici; ambientale, in relazione al comfort termo-igrometrico; e di durabilità, rispetto all'usura e agli agenti atmosferici. Tali prestazioni dipendono non solo dal materiale, ma anche dalla tecnica e dalla configurazione architettonica adottata, e devono essere confermate tramite prove sperimentali in laboratorio²³².

Le analisi condotte su materiali e elementi strutturali in adobe e pisé dimostrano che il comportamento meccanico della terra cruda è comparabile a quello di materiali lapidei come il tufo e la calcarenite²³³. In particolare, la resistenza a compressione uniassiale della terra cruda raramente supera i 5 MPa²³⁴. Per risultare conforme alle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008), il valore minimo deve essere di 2 MPa per i materiali resi-

229 Galdieri, Eugenio. *Scritti sulla terra: esempi di architettura*. Il Prato, 2010, pag. 43.

230 Ibidem.

231 Ibidem, pag. 46.

232 Galdieri, Eugenio. *Scritti sulla terra: esempi di architettura*. Il Prato, 2010, pag.50.

233 Ibidem.

234 Feretti, E.; Moretti, M.; Chiusoli, A.; Naldoni, L.; de Fabritiis, F.; Visonà, M. *Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing*. *Materials* 2022, 15, 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743>

stenti e di 2,5 MPa per le malte²³⁵. Per questo motivo, le costruzioni in terra devono essere concepite in modo massiccio, con pareti di grande spessore, al fine di garantire stabilità e sicurezza.

Tale approccio costruttivo, sebbene efficace, implica costi elevati e una bassa competitività rispetto alle tecniche moderne; per esempio, per realizzare una parete esterna di un solo piano è necessaria una resistenza minima di 2 MPa, raggiungibile con uno spessore minimo di 30 cm²³⁶. Tuttavia, se correttamente selezionata e messa in opera secondo le regole dell'arte, la terra cruda può essere considerata un materiale affidabile anche in zona sismica, a patto di adottare connessioni strutturali efficaci e garantire un processo produttivo controllato, in grado di mantenere costante la qualità del prodotto finale²³⁷.

235 Galdieri, Eugenio. *Scritti sulla terra: esempi di architettura*. Il Prato, 2010, pag.50.

236 Ferretti, E.; Moretti, M.; Chiusoli, A.; Naldoni, L.; de Fabritiis, F.; Visonà, M. *Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing*. Materials 2022, 15, 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743>

237 Ibidem.

4.2 STABILIZZAZIONE DELLA TERRA CRUDA: Approcci tradizionali e soluzioni bio-based

Alla luce di queste considerazioni, emerge l'esigenza di potenziare le prestazioni meccaniche del materiale attraverso interventi mirati di stabilizzazione del suolo.

Per "stabilizzazione" si intende qualsiasi processo volto a migliorare le proprietà meccaniche e la resistenza all'acqua della terra cruda. Questo miglioramento può essere ottenuto agendo sulla tessitura o sulla struttura del materiale, ovvero modificandone la porosità, la permeabilità o la coesione tra le particelle²³⁸.

Gli stabilizzanti possono essere di origine vegetale, animale, minerale o sintetica. Attualmente, i più utilizzati sono di tipo minerale, come il cemento Portland e la calce (aerea o idraulica), generalmente impiegati in percentuali comprese tra il 4% e il 10% del peso totale della terra cruda²³⁹.

Una pratica antica che ha dimostrato efficacia nel ridurre le fessurazioni da ritiro e aumentare la coerenza della miscela, è l'aggiunta di fibre naturali. Studi recenti hanno evidenziato come parametri quali la lunghezza delle fibre e il contenuto d'acqua siano determinanti per migliorare le proprietà meccaniche. Tuttavia, un dosaggio eccessivo di fibre (oltre il 10% in peso) può compromettere la resistenza a compressione²⁴⁰. Per questo motivo, si raccomanda un contenuto massimo del 5%, associato a una percentuale di argilla compresa tra il 13% e il 17%.

Parallelamente, il progresso scientifico ha portato allo sviluppo dei cosiddetti biostabilizzanti, prodotti di origine biologica capaci di migliorare le caratteristiche del terreno. Nel corso del XX secolo questi sono stati progressivamente sostituiti da stabilizzanti chimici industriali, considerati più performanti in termini di resistenza meccanica e controllo dell'umidità, ma questa transizione ha comportato nuove problematiche ambientali.

Ad esempio, l'uso del cemento come legante è efficace soprattutto nei terreni poveri di argilla, dove i prodotti dell'idratazione (silicati e idrossidi di calcio) rivestono le particelle del terreno, formando una matrice solida e idrofoba. Il processo di stabilizzazione richiede almeno 28 giorni, durante i quali i blocchi devono essere protetti dagli agenti atmosferici e mantenuti umidi per evitare essiccazioni rapide²⁴¹. Nei suoli ad alta plasticità invece, sono richieste quantità maggiori di cemento rispetto ai terreni poveri di argilla. Nonostante la sua efficacia, l'uso del cemento comporta importanti criticità ambientali: l'aumento dell'energia incorporata, dell'impronta di carbonio e della difficoltà di riciclo. Blocchi contenenti il 9% di cemento mostrano infatti una carbon footprint simile a quella dei mattoni cotti o del calcestruzzo debole. Inoltre, il cemento riduce la traspirabilità del materiale, influenzando negativamente il comfort igrotermico degli ambienti interni.

238 Galdieri, Eugenio. *Scritti sulla terra: esempi di architettura*. Il Prato, 2010, pag 48

239 Ibidem.

240 Giorgi, Alessandro. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*. Roma: Aracne, 2014, pag 40

241 Ibidem, pag. 42.

Distribuzione granulometrica del terreno"	Metodo di compattazione	aggiunta di cemento	condizioni di stagionatura	resistenza a compressione (MPa)
limo 18% argilla 18%	pressa idraulica 15 Mpa	8%	27 gg 70% RH	18,4 (AVG.)
ghiaia < 19mm ghiaia 32% sabbia 66% argilla+limo 2%	costipatore pneumatico	8%	2 giorni in casseforme 7 giorni protetto con involucro impermeabile 18 giorni in condizioni di aria secca	10 (AVG.) 10-12 (AVG.) 7-8 (AVG.)
ghiaia 26-50% sabbia 46-70% argilla+limo 4%	costipatore pneumatico	10%	28 giorni in condizioni di aria secca 13°-25°	13,8 (AVG.)
ghiaia 45% sabbia 40% limo 5% argilla 10%	costipatore pneumatico	4,5%	7 giorni ben avvolto, minimo 20 giorni in condizioni di aria secca	6,68 (AVG.)
ghiaia 20% sabbia 50% limo 25% argilla 5%	costipatore pneumatico	4,5%	6 giorni in condizioni di aria secca 2 giorni in condizioni di aria secca	5,25 (AVG.) 16 (AVG.)

AVG. = average value of compressive strenght (valore medio della resistenza a compressione)

RH= Umidità relativa

Tabella con i risultati della resistenza a compressione della CSRE (Cement-Stabilized Rammed Earth). Fonte: Anysz, H.; Narloch, P. Designing the Composition of Cement Stabilized Rammed Earth Using Artificial Neural Networks. Materials 2019, 12, 1396. <https://doi.org/10.3390/ma12091396>

Alla luce di questi limiti, la ricerca si sta orientando verso soluzioni alternative più sostenibili, come la bio-cementazione, tra cui la precipitazione di calcite indotta da microbi (MICP), e l'impiego di biopolimeri. Questi metodi, rientranti nella categoria della biostabilizzazione del suolo, mirano a rafforzare i legami tra particelle attraverso processi biologici naturali, riducendo l'impatto ambientale.

In tale contesto, si inserisce anche l'utilizzo della lolla di riso (RH), un sottoprodotto agricolo abbondante e ancora poco valorizzato. La RH rappresenta circa il 20–25% del raccolto di riso, e il suo impiego in edilizia contribuisce a evitarne lo smaltimento in discarica o la combustione a cielo aperto, generando benefici ambientali concreti.

L'uso più comune della RH è sotto forma di cenere di lolla di riso (RHA), la quale contiene tra l'85% e il 95% di silice e tra lo 0,5% e il 2% di allumina²⁴². L'aggiunta di RHA nei leganti geo-polimerici incrementa il rapporto silice/allumina (Si/Al), favorendo un miglioramento della resistenza a compressione dei leganti. Tuttavia, è fondamentale considerare che tale rapporto presenta un limite superiore, oltre il quale un ulteriore aumento del contenuto di silice può compromettere la formazione dei legami silicio-ossigeno-silicio (Si–O–Si), ostacolando l'evaporazione dell'acqua e riducendo l'efficacia della geo-polimerizzazione.

Un ulteriore miglioramento delle prestazioni si ottiene attraverso la triturazione meccanica

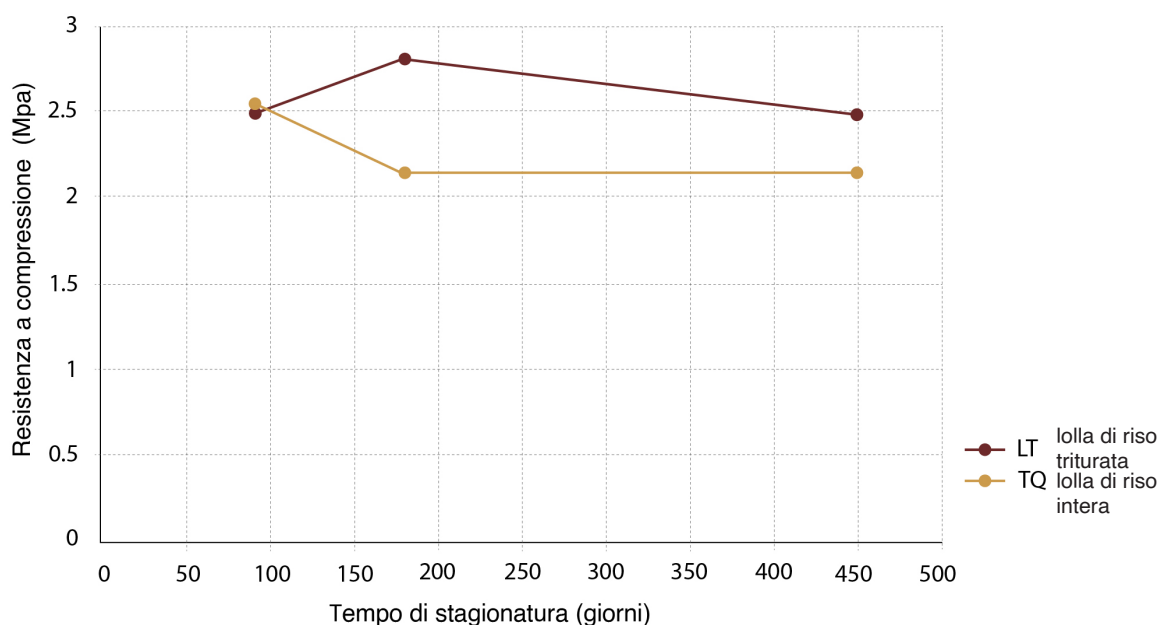


Fig. 158 Nell'ambito della campagna sperimentale volta a studiare l'effetto della granulometria della lolla di riso sulle proprietà meccaniche della terra stabilizzata con calce, i campioni LT (con lolla triturata) mostrano una resistenza a compressione leggermente superiore rispetto ai campioni TQ (con lolla intera). Questo aumento è probabilmente dovuto alla maggiore superficie di contatto tra lolla e calce, che favorisce la formazione di legami biocementanti. I valori di resistenza tendono a stabilizzarsi con il tempo di stagionatura, mentre la variabilità è leggermente maggiore nei campioni LT, suggerendo una lavorabilità più complessa.

Fonte: Ferretti, E.; Moretti, M.; Chiusoli, A.; Naldoni, L.; de Fabritiis, F.; Visonà, M. Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing. *Materials* 2022, 15, 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743>

della lolla, che aumenta la superficie di contatto delle particelle, favorendo così le reazioni chimiche e la coesione della miscela.

Quando la RH triturata viene combinata con calce aerea e acqua, si attiva un processo di mineralizzazione delle fibre che produce un bio-composito naturale. Questo composto risulta più resistente a muffe, insetti, roditori e fuoco, contribuendo a una maggiore durabilità complessiva.

La calce aerea, in particolare, indurisce progressivamente attraverso un processo di carbonatazione, reagendo con la CO_2 presente nell'aria e formando carbonato di calcio (CaCO_3). Questo composto stabile cementa le particelle della miscela, migliorandone la coesione e la durabilità nel tempo. Tale reazione chiude il cosiddetto "ciclo della calce", che parte dal calcare (CaCO_3), trasformato in ossido di calcio (calce viva), poi in idrossido di calcio (calce spenta), per tornare infine a carbonato grazie all'esposizione all'aria. Un processo analogo avviene nella MICP (Microbially Induced Calcium Precipitation), in cui microrganismi metabolizzano il calcio inducendo la formazione di cristalli di carbonato, rafforzando progressivamente la struttura del materiale²⁴³.

Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing. Materials 2022, 15, 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743>

243 Giorgi, Alessandro. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*. Roma: Aracne Editrice, 2014, pag 42.

È importante sottolineare che queste miscele si prestano anche all'impiego in tecnologie additive come la stampa 3D. Progetti sperimentali come Gaia e Tecla, realizzati dall'azienda italiana WASP in collaborazione con RiceHouse, dimostrano l'efficacia di questi materiali a base di lolla di riso e calce aerea, mostrando come sia possibile integrare le tecnologie digitali più avanzate con i principi dell'edilizia tradizionale.

Procedura sperimentale per la preparazione della miscela di terra con stabilizzanti

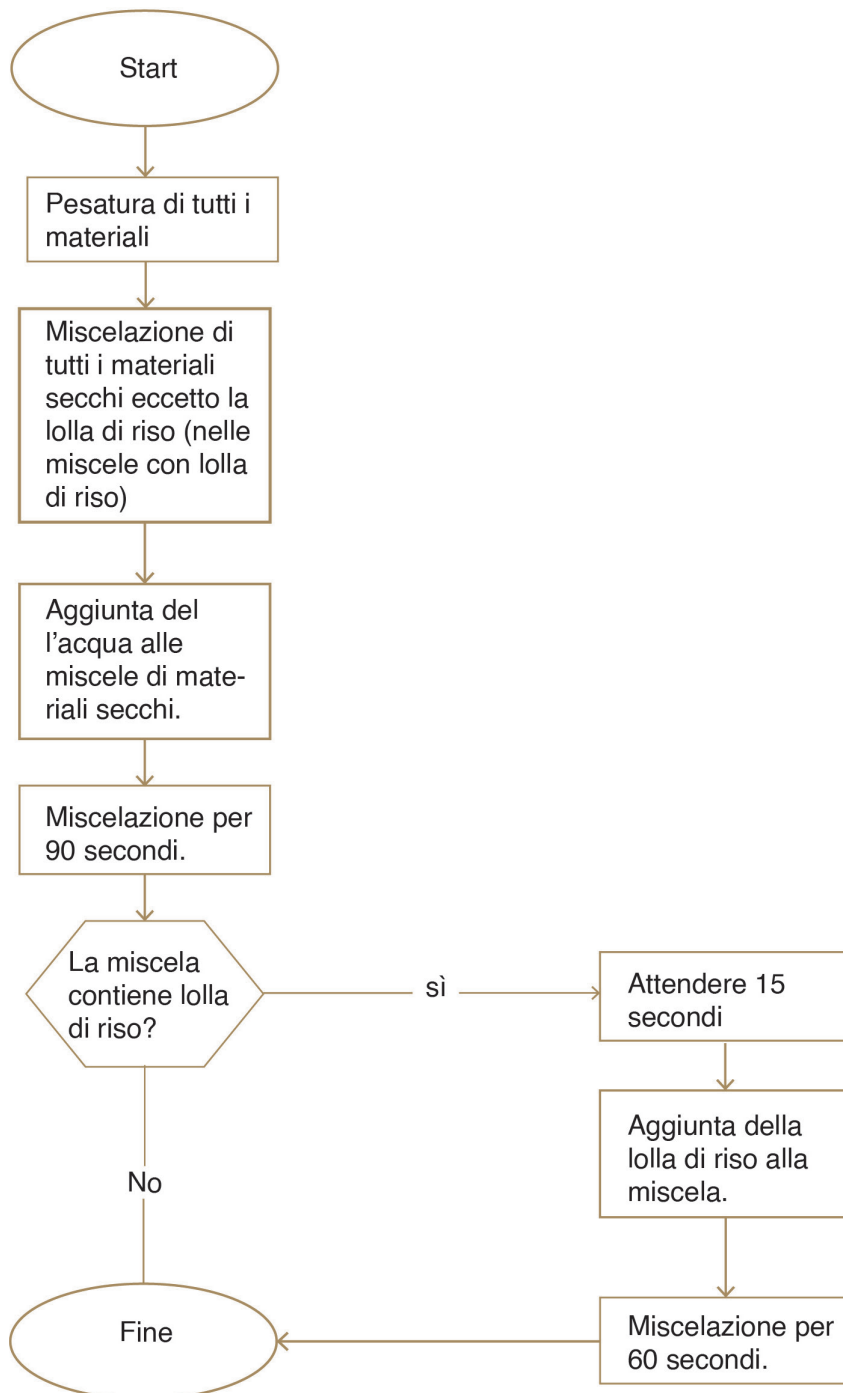


Diagramma: preparazione della miscela di terra con stabilizzanti. Preso da: Flora Faleschini, Daniel Trento, Maryam Masoomi, Carlo Pellegrino, Mariano Angelo Zanini; *Sustainable mixes for 3D printing of earth-based constructions*, Construction and Building Materials, Elsevier, 22 September 2023.



Fig.159 Lolla di riso



Fig. 160 Paglia



Fig.161 Calce aerea

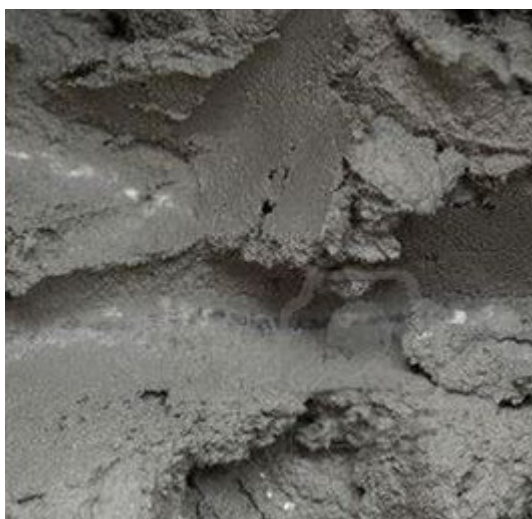


Fig. 162 Cemento



Fig. 163 Juta e peli di pecora.

Fig. 159 - 160 Lolla di riso e paglia. Fonte: <https://www.ricehouse.it/prodotti/materiali-vegetali-per-lisolamento/>

Fig. 161 Calce aerea. Fonte: <http://www.calceviva.it/prodotti-calce.html>

Fig. 162 Cemento. Fonte: <https://www.casapratice.it/materiali/muri-e-muratura/composizione-calcestruzzo.asp> (cemento)

Fig. 163 Juta e peli di pecora. Fonte: <https://planetaviary.com/product/jute-white-goat-hair-nesting-material/>

4.3 Vantaggi e accorgimenti della costruzione in terra

Perché costruire oggi in terra? L'impiego della terra cruda offre numerosi vantaggi, non solo dal punto di vista ambientale, ma anche economico e prestazionale. Tuttavia, per garantirne l'efficacia e la durata nel tempo, è fondamentale adottare una progettazione accurata e seguire alcuni accorgimenti specifici durante la costruzione.

Tra i principali benefici della terra cruda spiccano diversi aspetti importanti. Innanzitutto, la sua capacità di regolare naturalmente l'umidità interna, grazie alla possibilità di assorbire e rilasciare vapore acqueo, aiuta a mantenere un microclima interno equilibrato, migliorando il comfort abitativo. Inoltre, grazie alla sua massa, la terra contribuisce a stabilizzare la temperatura interna degli ambienti, riducendo così la necessità di ricorrere a sistemi attivi di riscaldamento o raffrescamento. Le sue caratteristiche isolanti e fonoassorbenti la rendono un materiale particolarmente adatto per costruire ambienti confortevoli.

Un altro grande vantaggio riguarda la sostenibilità ambientale: la terra è un materiale naturale e, spesso, locale, il che significa che l'impatto ambientale legato all'estrazione, al trasporto e alla lavorazione risulta molto ridotto rispetto ad altri materiali da costruzione. Inoltre, la terra è completamente riciclabile e, una volta dismessa, può essere reimmessa nell'ambiente senza causare danni, rappresentando così una scelta ecologica e responsabile. Anche dal punto di vista economico, l'uso della terra è vantaggioso, soprattutto in contesti dove questo materiale è facilmente reperibile, riducendo i costi di approvvigionamento e di trasporto. La manutenzione delle strutture in terra, infine, risulta semplice e poco costosa.

Nonostante tutti questi vantaggi, la terra cruda presenta alcune limitazioni naturali. Ad esempio, la presenza di argilla la rende sensibile all'acqua e al gelo, poiché l'umidità e le basse temperature possono provocare fratture nella struttura. Inoltre, durante l'essiccazione, il materiale tende a subire un ritiro differenziale, che può causare la formazione di crepe e fessurazioni. Va anche considerato che la composizione della terra varia molto a seconda del luogo di provenienza; perciò, è sempre necessario effettuare un'analisi preliminare per valutare se quel particolare terreno sia adatto alla costruzione.

1. Schema: **Caratteristiche e vantaggi della terra come materiale da costruzione:**



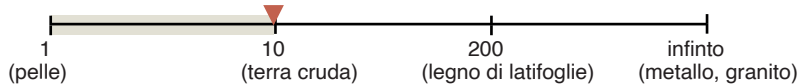
Densità Kg/m³



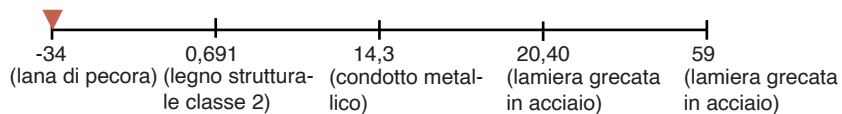
Conducibilità termica



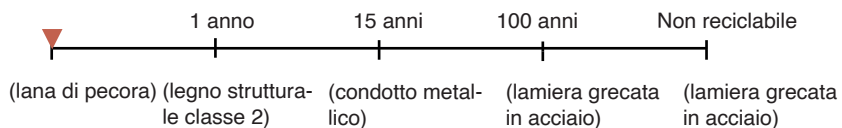
Fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo “μ”



Energia grigia – Bilancio carbonico in kg CO₂ eq/UF



Reciclabilità



Disponibilità della risorsa



abbondante



limitato



raro

Seconda vita



riutilizzabile



reciclabile



non riciclabile e
non riutilizzabile

▼ terra cruda

Punti critici nella costruzione in terra cruda

Affinché una costruzione in terra cruda sia durevole e funzionale, è essenziale prevedere una progettazione mirata alla protezione del materiale dall'acqua e dall'umidità e svolgere una manutenzione ordinaria.

- Progettazione delle fondazioni e del basamento: devono essere realizzati in modo da isolare la parte muraria dal terreno umido, evitando risalite capillari.
- Copertura adeguata: è fondamentale che il tetto abbia un'ampia sporgenza per proteggere le pareti dalle precipitazioni, con sistemi di raccolta e smaltimento delle acque piovane.
- Connessioni tra elementi costruttivi: le giunzioni tra muri e solai devono essere progettate con attenzione per garantire stabilità e prevenire infiltrazioni.
- Protezione delle superfici esterne: l'uso di intonaci specifici è indispensabile per proteggere la terra cruda dall'azione diretta degli agenti atmosferici. Gli intonaci agiscono da superfici di sacrificio, rallentando il degrado del materiale sottostante.
- Periodo di costruzione: la fase di essiccazione dei blocchi o delle pareti deve avvenire in condizioni climatiche favorevoli, preferibilmente durante i mesi più caldi e asciutti, per garantire una corretta stabilizzazione del materiale.

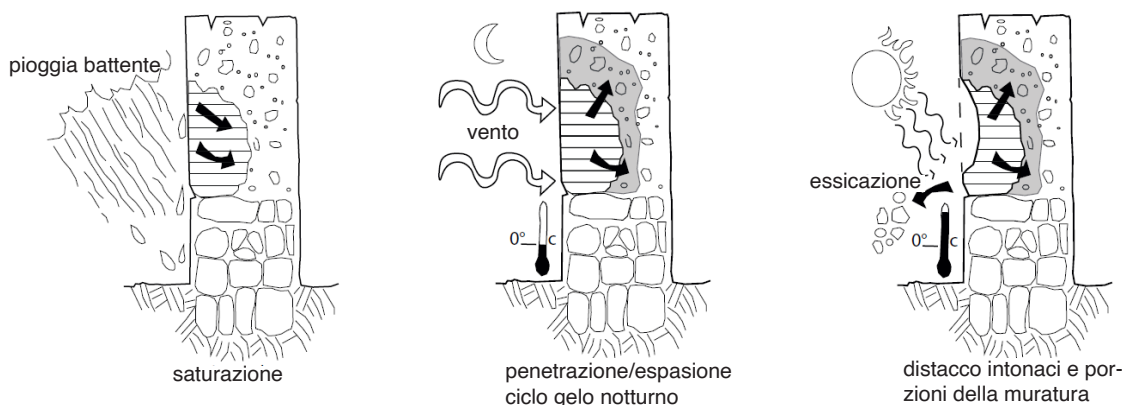


Fig. 164 Principali erosioni della terra per via degli agenti atmosferici. Fonte: Michele Zampilli, *La terra cruda in ambito sismico*, Roma tre, 2018-19, pag. 32. https://www.academia.edu/39812543/La_terra_cruda_in_ambito_sismico

Inoltre, è importante studiare preliminarmente la sensibilità all'acqua dei minerali argillosi presenti, tenendo conto che l'argilla rappresenta solo una frazione (tra il 5% e il 20%) della terra cruda. La sua presenza, se non correttamente gestita, può incidere negativamente sulla coesione e sulla resistenza meccanica del materiale. Infine, la persistenza dell'umidità sulle superfici può favorire lo sviluppo di vegetazione (alghe, muschi, licheni, piante), con conseguente accelerazione dei processi di degrado e perdita di integrità materica.

Tipici errori costruttivi

1. Assenza di coldolo
2. Architravi che non si estendono sufficientemente nella muratura
3. Distanza tra porte e finestra troppo ridotta
4. Distanza tra apertura e contonale troppo ridotta.
5. Assenza di plinto
6. Finestra troppo larga in proporzione all'altezza
7. Sezione del muro troppo esile in relazione all'altezza
8. Bassa qualità della malta; le congiunzioni verticali non sono riempite; quelle orizzontali sono troppo spesse (< 15 mm)
9. Tetto troppo pesante
10. Raccordo tetto-muro ridotto

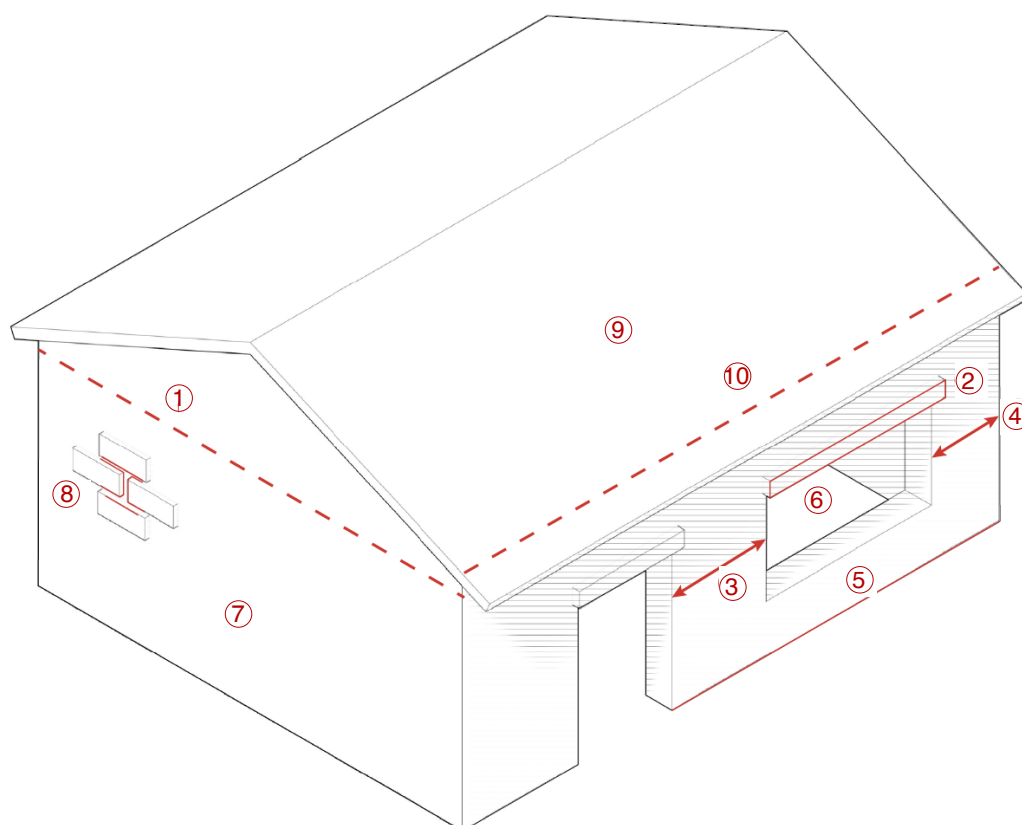


Fig. 165 Tipici errori costruttivi e punti critici della costruzione in terra cruda. Fonte: Michele Zampilli, *La terra cruda in ambito sismico*, Roma tre, 2018-19, pag. 42. https://www.academia.edu/39812543/La_terra_cruda_in_ambito_sismico

La sfida risiede dunque non soltanto nel recupero delle tecniche tradizionali, ma nella loro reinterpretazione critica, capace di integrare le conoscenze storiche con le più avanzate tecnologie costruttive, al fine di garantire durabilità, sicurezza e qualità architettonica. Questo processo richiede inoltre un'attenzione rigorosa alla gestione delle caratteristiche intrinseche del materiale, come la sensibilità all'umidità e la coesione meccanica, elementi che, se trascurati, possono compromettere la stabilità e la longevità delle strutture. All'analisi storica delle tecniche costruttive e delle pratiche di stabilizzazione più recenti emerge la notevole adattabilità della terra ai contesti locali, sia climatici che culturali. L'integrazione tra saperi tradizionali e tecnologie contemporanee consente di sviluppare soluzioni costruttive performanti, sostenibili e culturalmente radicate. Solo in questo equilibrio tra tutela, innovazione e rigore tecnico, la terra, materiale versatile e resiliente, può consolidare il proprio ruolo nel panorama dell'architettura contemporanea e futura.

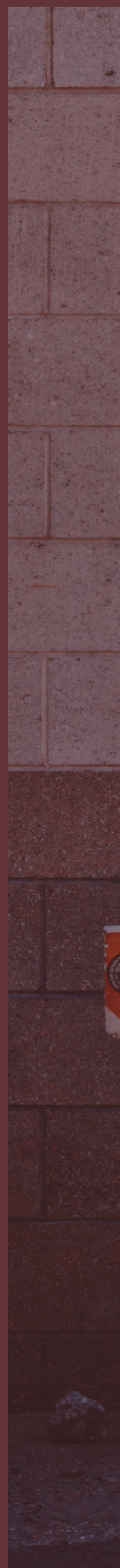




Fig. 166 Fotografia di Matthew Garoffolo. Fonte: <https://unsplash.com/it/foto/recinzione-di-legno-bianca-e-arancione-accanto-alla-porta-nera-XUg8-SF5URA>

5.0 Per quale motivo la costruzione in terra cruda, nonostante i suoi vantaggi, non viene applicato in modo diffuso?

Nonostante la terra cruda rappresenti oggi uno dei materiali più promettenti per la costruzione sostenibile, il suo impiego su larga scala è ancora limitato da una serie di ostacoli normativi, culturali, tecnici e produttivi. Queste criticità rendono difficile la sua diffusione nel contesto edilizio.

Una delle principali criticità riguarda l'assenza di una normativa chiara e condivisa che riconosca la terra cruda come materiale da costruzione regolamentato a tutti gli effetti. Attualmente, in molti Paesi europei, Italia inclusa, manca una legislazione specifica che consenta l'uso della terra cruda secondo standard prestazionali certi, creando incertezza sia per i progettisti che per i committenti.

A ciò si aggiunge la scarsa consapevolezza del fruitore finale, che spesso associa la costruzione in terra a condizioni di povertà o precarietà. Anche i professionisti, tuttavia, risultano poco formati su questo fronte. Non è quindi soltanto l'utente finale a fare la differenza: in molti casi, come dimostrano i casi studio analizzati in questa tesi, il cambiamento dipende anche dal ruolo e dalle competenze dei professionisti coinvolti.

Inoltre, i pregiudizi culturali sono ancora radicati e ostacolano l'interesse nei confronti di questo materiale, nonostante le sue qualità igrometriche, termiche e ambientali. In molti casi tali pregiudizi si traducono anche in difficoltà di accesso al credito²⁴⁴, con le banche che esitano a concedere mutui per edifici realizzati con tecniche non convenzionali.

Di conseguenza, la filiera produttiva è estremamente ridotta, con un numero limitato di imprese, artigiani e tecnici in grado di lavorare e gestire la terra cruda. Questo comporta non solo un innalzamento dei costi di realizzazione, dovuto alla scarsità delle maestranze qualificate, ma anche una difficoltà strutturale a diffondere il materiale oltre ambiti sperimentali o di nicchia²⁴⁵.

Un ulteriore ostacolo risiede nella variabilità delle tecniche costruttive: la terra cruda non è un materiale uniforme, ma assume caratteristiche diverse in base alla composizione, al luogo di estrazione e alla tecnica applicativa (adobe, pisé, cob, terra-paglia, ecc.). Questa varietà, se da un lato arricchisce le possibilità costruttive, dall'altro richiede un recupero del know-how tecnico e culturale²⁴⁶ che si è in gran parte disperso negli ultimi decenni.

Per superare tali limitazioni, è oggi necessario investire nella conoscenza, sia sul piano culturale che tecnico-scientifico. La promozione della terra cruda come materiale edilizio richiede un linguaggio condiviso tra progettisti, tecnici, istituzioni e cittadini. Solo attraverso un processo coordinato di formazione, sperimentazione e normazione sarà possibile rendere la terra cruda una reale alternativa sostenibile e replicabile nel settore delle costruzioni contemporanee.

244 Giorgi, A. Guida pratica alle costruzioni in terra cruda, Roma, Aracne Editrice, 2014, pag.8

245 Ibidem

246 Ibidem.

5.0.1 Considerazioni economiche

Nonostante la terra sia una risorsa naturale abbondante, locale e a basso costo, costruire in terra cruda risulta oggi, paradossalmente, spesso più costoso rispetto alle tecniche convenzionali. Questa apparente contraddizione non deriva dal materiale in sé, ma da fattori legati alla manodopera²⁴⁷ qualificata, ai tempi di realizzazione e, sempre più spesso, all'impiego di tecnologie avanzate. Le tecniche tradizionali in terra cruda richiedono una lavorazione artigianale accurata, basata su competenze specifiche che sono andate in gran parte perdute e che oggi necessitano di una formazione specializzata. Questo fa lievitare i costi rispetto a un sistema edilizio industrializzato fondato su logiche di standardizzazione e velocità di esecuzione.

Negli ultimi anni, inoltre, l'adozione di macchinari complessi, robot per la prefabbricazione e tecnologie di stampa 3D con terra ha rappresentato un'importante evoluzione per il settore, ma ha anche contribuito ad alzare ulteriormente i costi iniziali di investimento. Sebbene queste tecnologie offrano soluzioni innovative, efficienti e replicabili, esse restano oggi accessibili solo a una ristretta fascia di operatori, compromettendo la diffusione su larga scala della terra cruda come opzione economicamente competitiva.

In assenza di un sostegno istituzionale adeguato, come incentivi fiscali, norme favorevoli o accesso a finanziamenti mirati, i costi della costruzione in terra cruda continuano a pesare principalmente sul singolo committente o su progettisti motivati da ragioni etiche e ambientali. È quindi necessaria una revisione dell'intero sistema economico dell'edilizia per includere nel calcolo del valore anche i benefici sociali, ambientali e culturali di questo approccio costruttivo, troppo spesso ignorati nelle logiche di mercato²⁴⁸.

5.0.2 Limitazioni del quadro normativo in Italia

Uno dei principali ostacoli alla diffusione della costruzione in terra cruda nel contesto italiano risiede nella mancanza di un riconoscimento normativo univoco e aggiornato che ne consenta l'utilizzo in modo esteso, strutturato e conforme alle attuali esigenze di sicurezza. Ad oggi, infatti, non è possibile realizzare edifici portanti in terra cruda, poiché questa tecnica costruttiva non è contemplata dalla legge n. 64 del febbraio 1974²⁴⁹. Ciò implica che, anche nei territori dove la terra cruda è storicamente diffusa, essa non può essere impiegata per edifici strutturali, relegandola di fatto a una tecnica marginale o sperimentale.

L'unico riferimento normativo nazionale, seppur indiretto, è la legge n. 378 del 24 dicembre 2003²⁵⁰, che si occupa della tutela e valorizzazione dell'architettura rurale. Essa riconosce

247 2023-24 Lecture Series - Martin Rauch - Rammed Earth in Building Culture, presso Penn State Stuckeman School. <https://www.youtube.com/watch?v=2oEKOxbNc3M>

248 Dethier, Jean. *The Art of Earth Architecture: Past, Present, Future*. New York: Princeton Architectural Press, 2020, pag.476.

249 Giorgi, A. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Roma: Aracne Editrice, 2014, pag.148

250 Legge 24 dicembre 2003, n. 378, in "Disposizioni per la tutela e la valorizzazione dell'architettura rurale - CEDTERRA". <https://casediterra.com/web/category/legislazione-in-italia/leggi-in-vigore-nazionale/>

il valore culturale e storico delle costruzioni in terra cruda realizzate tra il XIII e il XIX secolo, ma non disciplina in alcun modo il loro utilizzo in nuove edificazioni o ristrutturazioni strutturali contemporanee.

Per ovviare a questa lacuna, nel tempo sono state avanzate varie proposte di legge, tra cui la proposta Schirru n. 2358 (2009), nata dall'unificazione dei progetti di legge a firma Lion (C. 2347) e Cossa (C. 4019). Tali proposte miravano a regolamentare e incentivare l'edificazione in terra cruda, riconoscendone ufficialmente le tecniche (tra cui adobe, pisé, cob), la varietà dei materiali e i vantaggi in termini di sostenibilità, economia circolare e comfort abitativo²⁵¹. Tra gli obiettivi principali delle proposte si evidenziava: la promozione del riuso delle tecniche tradizionali, il sostegno all'artigianato locale, la valorizzazione dell'inerzia termica e della salubrità del materiale, nonché la costituzione di un fondo nazionale per la promozione delle costruzioni in terra cruda. Tuttavia, queste proposte non si sono mai tradotte in una legge approvata, lasciando il settore in una condizione di incertezza normativa.

A livello regionale, alcune amministrazioni si sono attivate per la tutela del patrimonio in terra cruda.

L'**Abruzzo** ha introdotto normative specifiche fin dagli anni '90, con la legge regionale n. 17/1997, poi seguita dalle leggi n. 5/2001 e n. 22/2002, finalizzate al recupero e alla valorizzazione delle costruzioni tradizionali, con attenzione particolare al miglioramento delle prestazioni termo-acustiche²⁵². La Regione **Piemonte**, invece, ha emanato nel 2006 la legge regionale n. 2 (Legge regionale n. 2 del 16 gennaio 2006) "Norme per la valorizzazione delle costruzioni in terra cruda", che prevede misure concrete di sostegno economico, censimento del patrimonio, promozione della formazione tecnica e della ricerca²⁵³. In tal senso nel 2007, Nel 2007, grazie ai fondi stanziati, le province di Asti e Alessandria hanno avviato il primo corso rivolto ai professionisti²⁵⁴, con l'obiettivo di fornire ai tecnici locali le competenze necessarie per interagire in modo appropriato con il patrimonio edilizio in terra cruda e con le relative tecniche di intervento. In linea con questo approccio, è stato inoltre pubblicato il manuale per il recupero delle costruzioni in terra cruda in Sardegna, parte della più ampia collana di Manuali per il recupero dei centri storici, riconosciuti come beni paesaggistici dal Piano Paesaggistico Regionale. Tuttavia, nonostante il valore di queste iniziative, esse non rispondono in maniera concreta e strutturata alle esigenze contemporanee di controllo e standardizzazione dei prodotti, componenti e procedure costruttive in terra cruda.

Il panorama normativo nazionale rimane frammentato e inadeguato. La mancanza di norme tecniche ufficiali per la progettazione e l'esecuzione di edifici in terra cruda rende difficile il lavoro per progettisti, imprese e amministrazioni locali, ostacolando anche l'accesso al credito e alle assicurazioni. In altri Paesi europei, come Germania, Francia e Austria, la

251 Proposta di Legge Schirru, in "CEDTERRA", <https://caseditera.com/web/proposta-legge-schirru/>

252 Legge regionale 22/02/1997, n. 17, in "Regione Abruzzo", 11 ottobre 2019, <https://www2.regione.abruzzo.it/content/legge-regionale-22021997-n-17>

253 Norme per la valorizzazione delle costruzioni in terra cruda, in "ARIANNA, banca dati normativa del Piemonte", 16 gennaio 2016. <http://arianna.cr.piemonte.it/iterlegcoordweb/dettaglioLegge.do?urnLegge=urn:nir:regione.piemonte:legge:2006;2@2025-05-21&tornaIndietro=true>

254 Eugenio Galdieri, *Scritti sulla terra*, Saonara, Il prato, 1 gennaio 2010, pag 89.

situazione appare più avanzata, con la definizione di standard tecnici (es. norme DIN)²⁵⁵ e l'adozione di pratiche costruttive consolidate.

Alla luce di un rinnovato interesse per l'edilizia ecocompatibile e in considerazione del fatto che circa il 40% della popolazione mondiale vive tuttora in case in terra cruda, risulta urgente elaborare un quadro normativo nazionale. Solo attraverso un'adeguata regolamentazione sarà possibile favorire la diffusione di un materiale dalle riconosciute qualità ambientali, termiche e sociali, trasformando un patrimonio vernacolare in risorsa concreta per la transizione ecologica dell'abitare contemporaneo.

5.0.3 Barriere culturali della progettazione in terra cruda

Un altro principale ostacolo alla diffusione della terra cruda in architettura è di natura culturale. Nonostante le sue qualità ecologiche, economiche e tecniche, la terra cruda continua a essere percepita come un materiale arcaico, fragile e inadatto all'edilizia contemporanea. Questa visione è il risultato di una lunga marginalizzazione del sapere costruttivo tradizionale, alimentata dalla supremazia culturale del cemento e dei materiali industriali, oggi considerati standard nella formazione accademica e nella pratica professionale. Come evidenzia Jean Dethier in: *The Art of Earth Architecture: Past, Present, Future*, "la terra cruda è ancora oggi oggetto di una lotta", e richiede una "sublime ostinazione" da parte di progettisti e costruttori per superare i pregiudizi istituzionali e normativi che la relegano a una nicchia sperimentale.

D'altra parte, l'impiego della terra cruda come materiale da costruzione è storicamente diffuso in numerose aree del pianeta; lo dimostra il fatto che, ancora oggi, un terzo della popolazione mondiale vive e lavora in edifici realizzati con questo materiale. Ciò conferma in maniera inequivocabile che, in ogni parte del mondo, pur adottando tecniche costruttive differenti e opportuni accorgimenti, la terra è stata riconosciuta come materiale di qualità e degno di essere utilizzato in edilizia. La persistenza, nel corso dei millenni, di costruzioni in terra situate sia nelle zone equatoriali sia in aree ad alte latitudini costituisce una prova concreta, più convincente di qualsiasi altra argomentazione, della validità di questo materiale e delle tecniche costruttive ad esso associate²⁵⁶.

L'inadeguatezza dell'offerta formativa universitaria è una delle espressioni più manifeste di questa barriera culturale. In molte scuole di architettura e ingegneria, la terra cruda è completamente assente dai programmi di studio o trattata superficialmente, generando un vuoto di conoscenze che si riflette nella scarsa considerazione della sua applicazione nei progetti edilizi contemporanei. Questa lacuna formativa alimenta un circolo vizioso in cui i futuri professionisti non ricevono né gli strumenti né la sensibilità necessaria per considerare materiali alternativi, portando a una standardizzazione delle soluzioni costruttive sempre più disancorata dal contesto ambientale e culturale locale.

La cultura architettonica dominante, basata su logiche di efficienza economica e prestazioni tecniche misurate secondo parametri industriali, spesso ignora la specificità e il potenziale della terra cruda.

255 Giorgi, A. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Roma: Aracne Editrice, 2014, pag.144-145.

256 Eugenio Galdieri, *Scritti sulla terra*, Saonara, Il prato, 1 gennaio 2010, pag 43.

I tecnici «cercano di “stabilizzare” la terra cruda con calce o cemento» nel tentativo di adattarla ai test normativi pensati per il calcestruzzo, annullando così la sua identità come materiale vivo e contestuale²⁵⁷. Ne risulta una perdita non solo tecnica, ma anche simbolica, poiché viene negata la validità di saperi costruttivi millenari, capaci di garantire durabilità e resilienza senza fare ricorso a soluzioni ad alto impatto ambientale.

Superare questa barriera culturale richiede un cambiamento di paradigma nella formazione, nella ricerca e nella pratica edilizia, volto a rivalutare la terra cruda non come reliquia del passato, ma come risorsa per il futuro. Serve un’educazione basata sull’esperienza, sull’apprendimento attraverso la sperimentazione, e sulla libertà progettuale, in grado di restituire dignità e valore all’atto del costruire con la terra.

Tuttavia, chi oggi si cimenta in questo campo si scontra con ostacoli considerevoli: norme restrittive, standard rigidi, procedure burocratiche che favoriscono soluzioni industriali convenzionali, e un sistema tecnico-produttivo dominato da logiche che soffocano le alternative creative in favore delle direttive dei grandi gruppi multinazionali. I progetti in terra cruda, troppo spesso, vengono rallentati o bloccati da queste dinamiche. Come ricorda Rudy Ricciotti, “l’architettura è uno sport da combattimento”, e in questo contesto solo i professionisti più determinati e competenti riescono a superare le barriere e contribuire all’affermazione di un percorso edilizio alternativo e necessario.

Perché ciò avvenga, accanto a riforme politiche capaci di ridurre tali vincoli, è fondamentale investire nella formazione di nuove generazioni di progettisti e artigiani in grado di padroneggiare tutti gli aspetti della costruzione in terra. Ad oggi, solo l’ENSAG di Grenoble, grazie al lavoro del centro CRAterre, offre un diploma di Stato specifico in questa disciplina, frutto di un modello didattico concreto ed efficace che meriterebbe di essere adottato su scala internazionale. Questa “rivoluzione culturale ed educativa”, avviata da Patrice Doat, ha aperto la strada per un futuro in cui la costruzione in terra possa essere pienamente valorizzata.

La costruzione in terra richiede un atteggiamento di umiltà e la disponibilità a comprenderne a fondo le peculiarità, superando l’attuale approccio progettuale spesso acritico²⁵⁸. Perché la terra cruda possa affermarsi nel mondo contemporaneo, è necessario coniugare sapienza tecnica tradizionale e innovazione tecnologica, integrando materiali, metodologie e strumenti digitali in un processo costruttivo consapevole e multidisciplinare. Le nuove tecnologie possono infatti ampliare le potenzialità della terra cruda, garantendone qualità, durabilità e competitività rispetto ai sistemi costruttivi convenzionali.

Come ricorda il filosofo e sociologo Edgar Morin, “*i grandi movimenti di trasformazione iniziano sempre in modo marginale, deviante, modesto o addirittura invisibile*”²⁵⁹. La diffusione della terra cruda in architettura potrebbe seguire proprio questo percorso: una trasformazione lenta ma profonda, capace di restituire dignità e centralità a un sapere millenario,

257 Dethier, Jean. *The Art of Earth Architecture: Past, Present, Future*. New York: Princeton Architectural Press, 2020, pag.476.

258 Eugenio Galdieri, *Scritti sulla terra*, Saonara, Il prato, 1 gennaio 2010, pag 85.

259 Jean Dethier, *Abitare la terra: una nuova storia dell’architettura in terra cruda*, in “architectural-review”, 31 Gennaio 2020. <https://www.architectural-review.com/essays/inhabiting-the-earth-a-new-history-of-raw-earth-architecture>

in armonia con le sfide ambientali e sociali del nostro tempo.

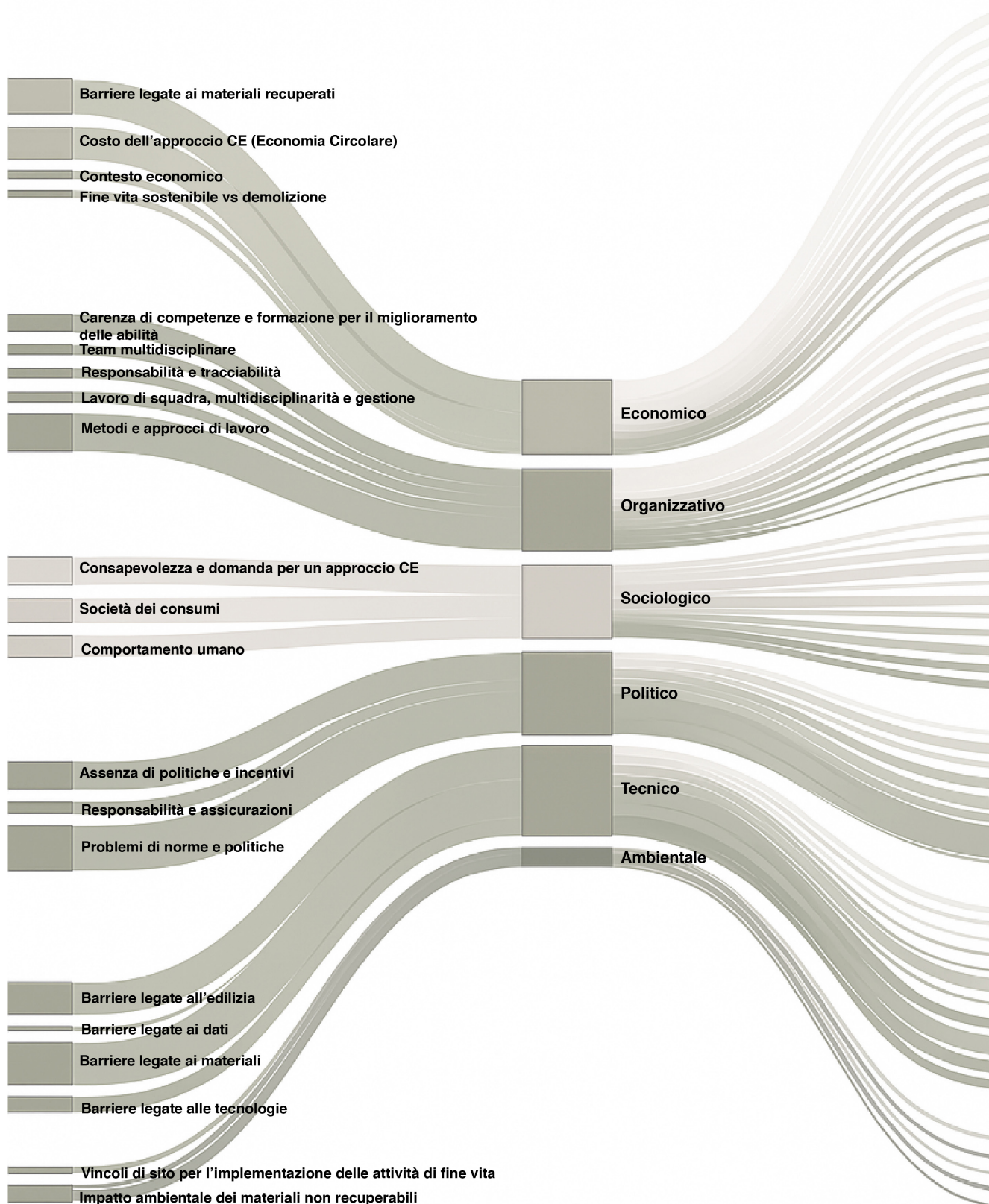
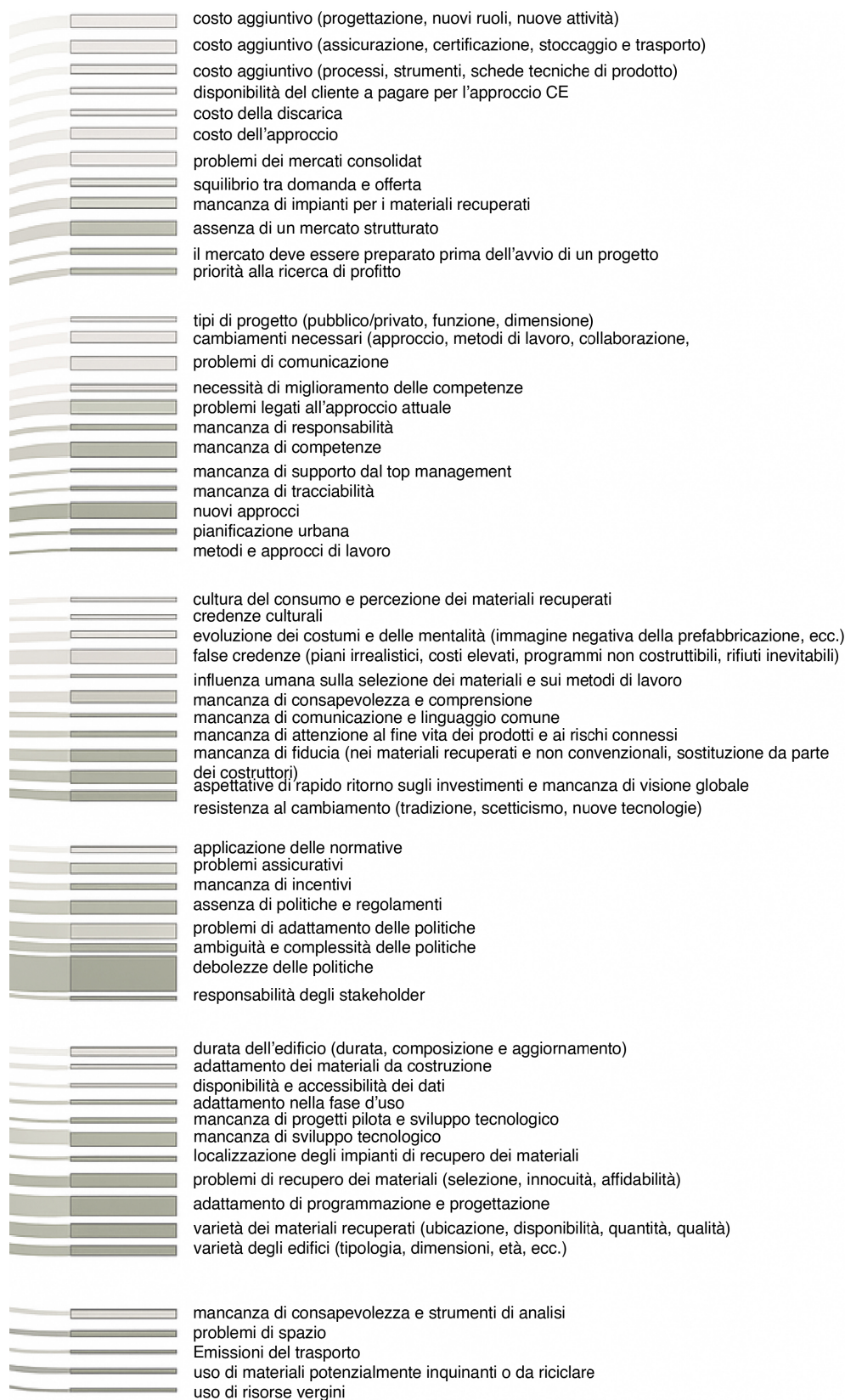


Fig. 167 Rileborazione dello schema in cui mostra i limiti dell'utilizzo della terra come materiale da costruzione nel contesto dell'economia circolare. Finte: Jean-Claude M., Rabia C., Erwan H., Antonin F., Chris B. and Quoc-Bao B., Earth as construction material in the circular economy context: practitioner perspectives on barriers to overcome, in "Philosophical transactions of the royal society", 4 agosto 2021. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>



Conclusioni

Negli ultimi anni il settore dell'edilizia ha conosciuto un periodo di intensa sperimentazione, volto a individuare un equilibrio tra l'impiego delle nuove tecnologie e l'utilizzo di materiali naturali. Questo processo riflette le esigenze del modello di sviluppo contemporaneo, in cui la produttività resta uno dei pilastri fondamentali, ma sempre più spesso si accompagna alla ricerca di sostenibilità ambientale. In questo contesto, l'integrazione di strumenti e processi innovativi si rivela cruciale per orientare l'architettura contemporanea verso costruzioni realizzate con materiali bio-based, tra cui la terra cruda, che sta riconquistando attenzione come materiale di progettazione capace di combinare tradizione e innovazione.

Il lavoro svolto ha confermato come la terra cruda, lungi dall'essere un retaggio del passato, possa rappresentare un materiale pienamente contemporaneo e strategico per la transizione ecologica dell'architettura. Le sue qualità intrinseche, ridotto impatto ambientale, capacità di regolazione igrometrica, riciclabilità e comfort abitativo, sono state confermate e approfondite, ma soprattutto messe in relazione con i processi innovativi che ne stanno ridefinendo le possibilità applicative. Dalla meccanizzazione dei cantieri alla prefabbricazione, fino alle sperimentazioni pionieristiche della stampa 3D, emerge chiaramente come la sfida non sia soltanto tecnica, ma anche sistemica: la terra cruda diventa competitiva quando si inserisce in filiere organizzate, in un quadro normativo adeguato e in una cultura progettuale capace di riconoscerne il valore.

Nonostante oggi quasi oltre tre miliardi di persone nel mondo vivano in abitazioni costruite con la terra cruda²⁶⁰, gli edifici che ne integrano l'uso con sistemi tecnologici avanzati restano ancora molto limitati. Le ragioni di questa situazione variano a seconda del contesto geografico e normativo. Nei paesi europei, e in particolare in Italia, un ostacolo rilevante è rappresentato dai codici edilizi, che spesso non consentono l'impiego delle più recenti tecniche di fabbricazione digitale additiva per strutture portanti realizzate con materiali considerati "non convenzionali". A questo si aggiungono pregiudizi culturali persistenti, che rallentano il riconoscimento del valore tecnico e progettuale della terra cruda. Nei paesi in via di sviluppo, invece, dove la costruzione in terra cruda è ancora diffusa, l'introduzione di tecnologie avanzate incontra difficoltà dovute alla carenza di infrastrutture energetiche e alla limitata disponibilità di personale specializzato.

Un'ulteriore evidenza emersa dalla ricerca riguarda i vantaggi introdotti dalle tecnologie avanzate. Come discusso nel secondo capitolo, l'impiego di strumenti innovativi consente di aumentare la produttività, ridurre la manodopera necessaria e abbreviare i tempi di realizzazione rispetto alle tecniche artigianali tradizionali. Questi benefici, sebbene accompagnati da un leggero incremento dell'impatto ambientale, restano comunque significativamente inferiori rispetto alle costruzioni realizzate con materiali convenzionali, come il calcestruzzo armato.

In questo scenario, il settore edilizio si conferma in continua trasformazione, alla ricerca di soluzioni capaci di coniugare produttività e sostenibilità, sperimentando materiali bio-based integrati con tecnologie avanzate. Un esempio emblematico è rappresentato dal progetto

260 Giorgi, A. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Aracne Editrice, 2014, pag. VIII

sperimentale ITACA del gruppo WASP²⁶¹, attualmente in fase di realizzazione mediante fabbricazione digitale additiva. Questo progetto propone un modello abitativo autosufficiente ed ecosostenibile, concepito come un piccolo ecosistema indipendente, capace di garantire a un nucleo familiare fino a quattro persone autonomia energetica, idrica e alimentare, senza alcun collegamento a reti esterne.

Tuttavia, affinché tali sperimentazioni possano generare un cambiamento reale e duraturo, è fondamentale che non rimangano confinate a nicchie ristrette. Devono trovare una diffusione più ampia, capace di incidere in maniera significativa su scala globale. È qui che il contributo di questa tesi diventa rilevante: essa colloca la terra cruda in una prospettiva duplice. Da un lato, come materiale tecnico da normare, testare e industrializzare; dall'altro, come materiale culturale, in grado di trasformare il nostro modo di pensare l'abitare e di ricostruire un rapporto più equilibrato con il territorio.

Innovare con la terra cruda non significa tornare indietro, ma aprire nuove possibilità: significa dare continuità a un sapere antico con gli strumenti della contemporaneità, costruendo un'edilizia più responsabile, circolare e radicata nei luoghi. In definitiva, questa tesi intende affermare che la terra cruda può diventare uno dei materiali del futuro, a condizione che il suo sviluppo sia accompagnato da un progetto collettivo che coinvolga ricerca, impresa, istituzioni e comunità. Solo così la terra cruda potrà smettere di essere percepita come un'alternativa marginale e affermarsi come componente strutturale del paesaggio architettonico contemporaneo, contribuendo concretamente alla costruzione di un modello abitativo sostenibile e giusto.

261 Alessandro Severi, *Itaca: la casa autosufficiente ed ecosostenibile stampata in 3D*, in "WASP", 11 ottobre 2022. <https://www.3dwasp.com/itaca-la-casa-autosufficiente-ed-ecosostenibile-stampata-in-3d/>

Bibliografia / Sitografia

Introduzione

Bibliografia:

- Giorgi, Alessandro. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Aracne, Roma, 2014.
- Stefano Nespor, *La scoperta dell'ambiente: Una rivoluzione culturale*, i Robinson / Letture, Bari, 2020.

Sitografia:

- Commissione europea, *Le cause dei cambiamenti climatici*, in "Climate action". https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_it (ultima consultazione agosto 2025)
- Parlamento europeo, *Le soluzioni dell'UE per contrastare i cambiamenti climatici*, in "Tematiche Parlamento europeo", 24 gennaio 2025. <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20180703STO07129/le-soluzioni-dell-ue-per-contrastare-i-cambiamenti-climatici> (ultima consultazione agosto 2025)

Capitolo 1

Bibliografia

- Heringer, Anna, Lindsay Blair Howe, and Martin Rauch. *Upscaling Earth: Material, Process, Catalyst*, Verlag, 2019 Zürich: gta Verlag, 2019.
- Antonio J. Sánchez-Garrido, Ignacio J. Navarro, José García, Víctor Yepes, *A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning*, Journal of Building Engineering, Volume 73, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106725>
- Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2023). *Fast-Growing Bio-Based Construction Materials as an Approach to Accelerate* United Nations Sustainable Development Goals. Applied Sciences, 14(11), 4850, maggio 2024. <https://doi.org/10.3390/app14114850>

Sitografia:

- P. Elisabetta, N. Silvia, C.Dario, B. Donato, B. Andrea, D. Gianmarco, P. Antonio, V. Nicolò, *L'Italia che Ricicla*, AssoAmbiente, Roma, 20 settembre 2023 <https://assoambiente.org/files/rapporto-italia-che-ricicla-2023.pdf> (ultima consultazione agosto 2025)
- Bain & Company, *Edilizia, pronta per la sfida della circolarità*, 24 gennaio 2023, <https://www.bain.com/it/about-bain/media-center/press-releases/italy/2023/Edilizia-pronta-per-la-sfida-della-circularita/> (ultima consultazione agosto 2025)
- Thomas Brown, *Moderni metodi di costruzione nel settore immobiliare*, "in Biblioteca dei camera dei lord", 9 agosto 2024. <https://lordslibrary.parliament.uk/modern-methods-of-construction-in-the-housing-industry/#heading-1> (ultima consultazione agosto 2025)
- Sam Hopkins, Matt Cooper, MMC Report, in "Government of Jersey – ARUP", 4 marzo 2022. <https://www.gov.je/SiteCollectionDocuments/Environment%20and%20greener%20living/R%20Modern%20Methods%20of%20Construction%20report.pdf> (ultima

consultazione agosto 2025)

- *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition*, in “Ellen MacArthur Foundation”, 1 Dicembre 2015, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition>(ultima consultazione agosto 2025)
- *Paradigma delle R*, in “Economia Circolare”, <https://economiecircolare.com/glossario/paradigma-delle-r/> (ultima consultazione agosto 2025)
- C. Daniele, R.Ennio, *Le sfide del mondo dei rifiuti nel settore delle costruzioni*, in “ingegno”, 8 giugno 2022. <https://www.ingegno-web.it/articoli/le-sfide-del-mondo-dei-rifiuti-nel-settore-delle-costruzioni/>(ultima consultazione agosto 2025)
- Ellen MacArthur Foundation, *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe (2015)*, pag 18, <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>. (ultima consultazione agosto 2025)
- Daniele Casadei, Ennio Rao, *Le sfide del mondo dei rifiuti nel settore delle costruzioni*, in “ingegno”, giugno 2022. <https://www.ingegno-web.it/articoli/le-sfide-del-mondo-dei-rifiuti-nel-settore-delle-costruzioni/>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Construction and demolition waste*, in “Enviroment”, 12 dicembre 2008, https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en (ultima consultazione agosto 2025)
- *What is linear economy?*, in “Ellen Macarthur Foundation”, 10 febbraio 2023. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/what-is-the-linear-economy> (ultima consultazione agosto 2025)
- *Case in legno e lolla di riso: il materiale più innovativo in edilizia è coltivabile*, in “Gruppo Secchiaroli”, 13 gennaio 2024. <https://www.grupposecchiaroli.it/case-in-legno-e-lolla-di-riso-il-materiale-pi-innovativo-in-edilizia--coltivabile-b171.php> (ultima consultazione agosto 2025)

Capitolo 2

Bibliografia:

- Scudo, Gianni et al. *Costruire con la terra: tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2001.
- Maria Luisa Germanà, *Architettura responsabile – Gli strumenti della tecnologia*, Dario Flacovio Editore s.r.l.,Palermo, ottobre 2005.
- F. Pacheco-Torgal, Said Jalali, *Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction, Construction and Building Materials*, Volume 29, 2012, Pages 512-519, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054> (ultima consultazione marzo 2025)
- Minke, Gernot. *Building with Earth : Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Third and Revised edition., Birkhäuser, 2013. <https://doi.org/10.1515/9783034608725>.

(ultima consultazione agosto 2025)

- Heringer, Anna, et al. *Upscaling Earth: Material, Process, Catalyst*. gta Verlag, 2019.
- Maskuriy, R.; Selamat, A.; Ali, K.N.; Maresova, P.; Krejcar, O. *Industria 4.0 per il settore delle costruzioni: quanto è pronto il settore?* Appl. Sci. 2019, 9, 2819. <https://doi.org/10.3390/app9142819> (ultima consultazione marzo 2025)
- Ferretti, E.; Moretti, M.; Chiusoli, A.; Naldoni, L.; De Fabritiis, F.; Visonà, M. *Mechanical Properties of a 3D-Printed Wall Segment Made with an Earthen Mixture*. Materials, 2022, 15, 438. <https://doi.org/10.3390/ma15020438> (ultima consultazione marzo 2025)
- Mohamed Gomaa, Sascha Schade, Ding Wen Bao, Yi Min Xie, *Automation in rammed earth construction for industry 4.0: Precedent work, current progress and future prospect*, Journal of Cleaner Production, Volume 398, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136569> (ultima consultazione marzo 2025)
- Yin, X.; Guo, C.; Sun, B.; Chen, H.; Wang, H.; Li, A. *The State of the Art in Digital Construction of Clay Buildings: Reviews of Existing Practices and Recommendations for Future Development*. Buildings 2023, 13, 2381. <https://doi.org/10.3390/buildings13092381> (ultima consultazione marzo 2025)
- Assunção, Julie Chadha, Kunaljit Vasey, Lauren Brumaud, Coralie Habert, Guillaume, *Can digital fabrication meet low-carbon materials? A closer look at the environmental impact of 3D printing with earth*, in “Proceedings of 19th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies (IC-NOCMAT 2023)”, Federal University of Paraíba, pag. 768 – 776, dicembre 2023, <https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-b-000640421>. (ultima consultazione agosto 2025)

Sitografia

- Path Hudson, *Rivoluzione industriale*, in “Treccani”. [https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-industriale_\(Enciclopedia-delle-scienze-sociali\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/rivoluzione-industriale_(Enciclopedia-delle-scienze-sociali)/). (ultima consultazione marzo 2025)
- L. Guaranga, *La seconda rivoluzione industriale (1870-1950)*, in “Leoneg archivio”, 2018 <http://www.leoneg.it/archivio/Industrializzazione%20e%20societa%20di%20massa.pdf> (ultima consultazione marzo 2025)
- Amodiovalerio Verde, *Retail (r) evolution - La terza rivoluzione industriale*, in LinkedIn”, 9 luglio 2019. <https://www.linkedin.com/pulse/retail-revolution-la-terza-rivoluzione-industriale-valerio-verde/> (ultima consultazione marzo 2025)
- *CRAterre*, in “Centre international de la construction en terre”, <https://craterre.org/>. (ultima consultazione marzo 2025)
- *Innovations*, in “ERDEN”. <https://www.erden.at/Innvations> (ultima consultazione 03/2025)
- *Rammed earth*, in “formearth”, sydney <https://formearth.com/>. (ultima consultazione marzo 2025)
- Burkard Meyer Architekten, *Centro di innovazione Erne Holzbau*, in “swissArchdigital”, 19 marzo 2024. <https://www.swiss-arc.ch/de/projekt/innovationszentrum-erne-holzbau/13190282> (ultima consultazione marzo 2025)

- *Padiglione delle Costellazioni in Ceramica*, in “progetti di ricerca - Università di ricerca”, 2017. https://www.arch.hku.hk/research_project/ceramic-constellation-pavilion/. (ultima consultazione marzo 2025)
- Alberto Chiusoli, *La prima Casa Stampata in 3D generata con la Terra / Gaia*, in “Casa, Comunicati Stampa”, 29 settembre 2018 <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-gaia/> (ultima consultazione agosto 2025)
- Jean Dethier, *Abitare la terra: una nuova storia dell'architettura in terra cruda*, in “architectural-review”, 31 Gennaio 2020. <https://www.architectural-review.com/essays/inhabiting-the-earth-a-new-history-of-raw-earth-architecture> (ultima consultazione agosto 2025)
- *Rivoluzione industriale*, in “Enciclopedia Treccani”, <https://www.treccani.it/enciclopedia/evoluzione-industriale/> (ultima consultazione agosto 2025)
- Elbert Chu, *How To Make Bricks Out Of Dirt*, in “popular science”, 30 maggio 2013. <https://www.popsci.com/technology/article/2013-05/building-blocks/> (ultima consultazione agosto 2025)
- *AECT2500HD compressed earth block machine*, <https://aectearthblock.com/2500hd-series> (ultima consultazione agosto 2025)
- Christian J. Lange, Donn Holohan, Holger Kehne, *Ceramic Constellation Pavilion*, progetto di ricerca - Università di Honk Kong, 2017, https://www.arch.hku.hk/research_project/ceramic-constellation-pavilion/ (ultima consultazione marzo 2025)
- *Our story, our people*, in “ERDEN”, <https://www.erden.at/Our-Story>. (ultima consultazione marzo 2025)
- New Construction: ERDEN Factory Workshop Lehm Ton Erde, in “Lehm ton erden”, <https://www.lehmtonerde.at/en/news/>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *ERDEN Werkhalle*, in “ERDEN” <https://www.erden.at/ERDEN-Werkhalle>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Lehm ton erde*, in “IoArch 109” gennaio / febbraio 2024, https://issuu.com/redazioneioarch/docs/ioarch_109_gennaio_2024. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Muri in terra battuta*, in “lehm ton erde” <https://www.lehmtonerde.at/en/products/product.php?aID=70> (ultima consultazione agosto 2025)
- Lehm ton erde, *Rammed Earth Walls from 100% Erde*, in “ERDEN” <https://www.erden.at/>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Il manifesto*, in “WASP”. <https://www.3dwasp.com/chi-siamo/#manifesto> (ultima consultazione agosto 2025)
- *Visioni*, in “WASP”. <https://www.3dwasp.com/en/about-us/> (ultima consultazione agosto 2025)
- LDM WASP, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-ceramica-delta-wasp-2040-clay/>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Big Delta WASP 12 mt*, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-gigante-big-delta-wasp-12mt/> (ultima consultazione agosto 2025)

- *La ricerca sui materiali*, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/en/bigdelta-the-history/>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Maker economy starter kit*, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/en/maker-economy-starter-kit/>. (ultima consultazione marzo 2025)
- *Supporto WASP*, in “WASP”. <https://www.3dwasp.com/supporto/> (ultima consultazione marzo 2025)
- *Il primo prototipo di abitazione ecosostenibile stampato in 3D in terra cruda*, in “MCA”, <https://www.mcarchitects.it/progetti/tecla-technology-and-clay> (ultima consultazione marzo 2025)
- Diego villa, *Clean extruder*, in “Wasp”, 29 febbraio 2024, [https://www.3dwasp.com/en/faq/clean-extruder/?utm_term=&utm_campaign=%5BSV%5D+PMax+-+Clay+40100+-+EN+\(Standard+EU\)&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=3352968755&hsa_cam=22703261242&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gad_campaignid=22699554950&gbraid=0AAAAADi5FmabpXPlyOOvrrfoGv-Z6HuGT&gclid=CjwKCAjw4K3DBhBqEiwAYtG_9MziESTTgJFomAlG1Hhg1F-q61J209Zpava9k9BpjJY-Ks4ZOgOs3tBoCiuoQAvD_BwE](https://www.3dwasp.com/en/faq/clean-extruder/?utm_term=&utm_campaign=%5BSV%5D+PMax+-+Clay+40100+-+EN+(Standard+EU)&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=3352968755&hsa_cam=22703261242&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gad_campaignid=22699554950&gbraid=0AAAAADi5FmabpXPlyOOvrrfoGv-Z6HuGT&gclid=CjwKCAjw4K3DBhBqEiwAYtG_9MziESTTgJFomAlG1Hhg1F-q61J209Zpava9k9BpjJY-Ks4ZOgOs3tBoCiuoQAvD_BwE). (ultima consultazione marzo 2025)
- *Big delta 12 mt*, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-gigante-bigdelta-wasp-12mt/> (ultima consultazione marzo 2025).
- *Crane WASP*, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/stampante-3d-per-case-crane-wasp/>. (ultima consultazione marzo 2025).
- Alberto Chiusoli, *La prima casa stampata in 3D con la terra I Gaia*, in “In casa, Comunicati stampa”, https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/?utm_term=&utm_campaign=GLOBAL-en-SE-DSASito&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=3352968755&hsa_cam=16280182754&hsa_grp=139246202851&hsa_ad=583042531321&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-19959388920&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAtYy9BhBcEiwANWQ-QL7j8bDeKqwalARbdfpeK7lfylt3xBBVO0wZkQqXBZQeg7taM4tVqOhoCjkQQAvD_BwE. (ultima consultazione marzo 2025)
- *Maker Economy Starter Kit*, in “Wasp”, <https://www.3dwasp.com/casa-stampata-in-3d-tecla/>. (ultima consultazione marzo 2025)
- *La ricerca e le tecnologie Mapei per TECLA*, in “MAPEI”, 4 novembre 2019. <https://www.mapei.com/it/it/news/dettaglio/2019/11/04/la-ricerca-e-le-tecnologie-mapei-per-tecla>. (ultima consultazione marzo 2025).
- *Case stampate in 3D per salvare il mondo. Massimo Moretti racconta il progetto WASP*, in “BBS”, 4 dicembre 2018. <https://www.bbs.unibo.it/case-stampate-in-3d-per-salvare-il-mondo-massimo-moretti-racconta-wasp/#gref>. (ultima consultazione marzo 2025).
- Lehm ton erden, *Rammed earth floors from 100% earth*, in “ERDEN”, <https://cloud.lehmtonerde.at/index.php/s/CQYGTxNAz3H9MW6/download>. (ultima consultazione marzo 2025).
- Lehm ton erden, *Interior Lining from 100% Earth*, in “ERDEN”. <https://cloud.lehmtonerde.at/index.php/s/CQYGTxNAz3H9MW6/download>.

de.at/index.php/s/CQYGTxNAz3H9MW6/download. (ultima consultazione luglio 2025)

- *Wasp hub*, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/en/wasp-hub/#hub> (ultima consultazione marzo 2025)

Capitolo 3

Bibliografia

- Zeleny M., *Human Systems Management. Integrating Knowledge, Management and Systems. Components and technology*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, Singapore, 2005, pp.182-185.
- Kapfinger O., *Martin Rauch refined earth – construction & design with rammed earth*, Edizioni di architettura, Basilea, 2001.
- Boltshauser, Roger et al. *Haus Rauch = the Rauch house: ein Modell moderner Leh-marchitektur = a model of advanced clay architecture*. Basel: Birkhäuser, 2011.
- Antonio J. Sánchez-Garrido, Ignacio J. Navarro, José García, Víctor Yepes, *A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning*, Journal of Building Engineering, Volume 73, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106725> (ultima consultazione agosto 2025)

Sitografia:

- Thomas Brown, *Moderni metodi di costruzione nel settore immobiliare*, “in Biblioteca dei camera dei lord”, 9 agosto 2024. <https://lordslibrary.parliament.uk/modern-methods-of-construction-in-the-housing-industry/#heading-1>. (ultima consultazione agosto 2025).
- Sam Hopkins, Matt Cooper, *MMC Report*, in “Government of Jersey – ARUP”, 4 marzo 2022. <https://www.gov.je/SiteCollectionDocuments/Environment%20and%20greener%20living/R%20Modern%20Methods%20of%20Construction%20report.pdf> (ultima consultazione agosto 2025).
- Chiara Salvini, *Rauch House – Agricultural School – Ricola Herb Centre, Martin Rauch*, in “Arketipo” 19 Gennaio 2023. <https://www.arketipomagazine.it/rauch-house-agricultural-school-ricola-herb-centre-martin-rauch/>. (ultima consultazione agosto 2025).
- AR Editors, *Rauch House in Austria by Roger Boltshauser with Martin Rauch*, in “The Architectural Review” 20 Febbraio 2020. <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/rauch-house-in-austria-by-roger-boltshauser-with-martin-rauch>. (ultima consultazione agosto 2025).
- Martin Rauch, *ceramista e ingegnere*, in “AMC”, 3 aprile 2016. <https://www.amc-archi.com/article/martin-rauch-ceramiste-et-ingenieur,4572>. (ultima consultazione agosto 2025)
- Thomas Wieckhorst, *Erosione controllata nelle costruzioni in argilla*, in “Bauhandwerk”, maggio 2011. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_Kontrollierte_Erosion_im_Lehmbau-1176521.html (ultima consultazione agosto 2025)
- Aurelio Greco, *Il rammed earth o pisè*, in “Un paesaggio per Biotopia”, 1 luglio 2020. <https://www.unpassaggioperbiotopia.org/materiali/principali-tecniche-di-posa-con-la-ter->

ra/rammed-earth-o-pise/. (ultima consultazione agosto 2025).

- Angel Castellarnau Visus, *Casa vernacolare del 21° secolo*, “in materiaaward”. <https://www.materiaaward.com/en/portfolio-item/21st-century-vernacular-house/>. (ultima consultazione agosto 2025).
- Edra Arquitectura, *Casa de Tapia ad Ayerbe*, “in Edra Arquitectura Km 0”, <https://arquitectura.edraculturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Una casa vernacolare contemporanea – Angels Castellarnau Visus*, “in amàco”, 2014. <https://amaco.org/une-maison-vernaculaire-contemporaine-angels-castellarnau-visus/>. (ultima consultazione agosto 2025)
- Irene Santiago Trabado, *La terra battuta come costruzione vernacolare del 21° secolo*. Edra e Angeli Castellarnau, “in airearQ”, 3 aprile 2018. <https://yrenadabrahma.wixsite.com/airearq/post/el-tapial-como-construcci%C3%B3n-vern%C3%A1cula-del-s.xxi.-e-dra-y-angels-castellarnau>. (ultima consultazione agosto 2025)
- *Casa vernacolare del 21° secolo / Edra arquitectura km0*, “in ArchDaily”, 06 agosto 2016. <https://www.archdaily.cl/cl/792766/casa-vernacula-del-siglo-xxi-edra-arquitectura-km0>. (ultima consultazione agosto 2025).
- *Tiranti e catene nelle murature: progettazione e funzioni*, in “Biblus”, 17 giugno 2024. <https://biblus.acca.it/tiranti-e-catene-nelle-murature-progettazione-e-funzioni/>. (ultima consultazione agosto 2025).
- Johanna Gibbons, Victoria Black, *Bushey New Jewish Cemetery*, in “Biennial Internacional de paisatge barcelona”, <https://landscape.coac.net/en/node/230>. (ultima consultazione agosto 2025).
- ArchDaily, *Bushey Cemetery / Waugh Thistleton Architects*, in “ArchDaily”, 4 settembre 2018. <https://www.archdaily.com/901249/bushey-cemetery-waugh-thistleton-architects>. (ultima consultazione agosto 2025).
- *Waugh Thistleton Architects* in “Waugh Thistleton Architetti”, <https://waughthistleton.com/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Alyn Griffiths, *Waugh Thistleton completa gli edifici cimiteriali con muri in terra battuta*, in “dezeen”, 22 novembre 2017. <https://www.dezeen.com/2017/11/22/waugh-thistleton-bushey-cemetery-rammed-earth-colonnade-extension-cemetery-hertfordshire-uk/#/>. (ultima consultazione agosto 2025).
- *Informazioni su Rammed Earth*, in “EARTH Structure”, <https://www.earthstructure-sgroup.com.au/about-rammed-earth/>. (ultima consultazione agosto 2025).
- *Cimitero di Bushey*, in “ElliottWood”, <https://www.elliottwood.co.uk/featured/bushey-cemetery>. (ultima consultazione agosto 2025).
- *Polvere alla polvere: Bushey New Cemetery, Hertfordshire, Regno Unito*, di Waugh Thistleton Architects, in “The Architectural Review”, <https://www.architectural-review.com/buildings/sacred-space/dust-to-dust-bushey-new-cemetery-hertfordshire-uk-by-waugh-thistleton-architects>. (ultima consultazione agosto 2025).
- Andrew Waugh, *Return to Earth*, in “Architecture Today”, <https://architecturetoday.com/>.

co.uk/return-to-earth/, (ultima consultazione agosto 2025).

- *New Construction: ERDEN Factory Workshop Lehm Ton Erde*, in “Lehm ton erden”, <https://www.lehmtonerde.at/en/news/#news236>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Thomas Wieckhorst, *Costruzione in terra battuta secondo i piani di Herzog & de Meuron per Ricola a Laufen*, in “bauhandwerk”, ottobre 2014. https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw_2014-10_Stampflembau_nach_Plaenen_von_Herzog_de_Meuron_fuer_Ricola_in_Laufen-2120058.html, (ultima consultazione agosto 2025).
- *369 Ricola Kräuterzentrum*, in “herzogdemeuron”, <https://www.herzogdemeuron.com/projects/369-ricola-krauterzentrum/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Jacques Herzog and Pierre de Meuron 2001 Laureates*, in “The Pritzker Architecture Prize”, https://www.pritzkerprize.com/sites/default/files/inline-files/2001_bio.pdf, (ultima consultazione agosto 2025).
- SRF Radiotelevisione Svizzera, *Centro Erboristeria Ricola*, Laufen, in “VOGT” 27 giugno 2014, https://www.vogt-la.com/print/ricola_herb_centre, (ultima consultazione agosto 2025).
- AR EDITORS, *Centro erboristico Ricola in Svizzera di Herzog e de Meuron con Martin Rauch*, in “The Architectural Review” 20 febbraio 2020. <https://www.architectural-review.com/buildings/earth/ricola-herb-centre-in-switzerland-by-herzog-and-de-meuron-with-martin-rauch>. (ultima consultazione agosto 2025).
- Con Roberta in nuove dimensioni di edificio in argilla, in “allergand!”, <https://allerhand-magazin.at/mit-robera-in-neue-lehmbau-dimensionen/?cookie-state-change=1737199446370>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Rincalzatrice per pareti in argilla per progetti su larga scala a Bordeaux*, in “REISCH MASCHINENBAU”, <https://www.reisch.at/de/unternehmen/news/beschicker-bordeaux.php>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Trasskalk*, in “LEHMAG”, <https://lehmag.ch/materialien/trasskalk/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Progetto del mese: Ricola Herb Center, Laufen, Svizzera*, in “Peikko”, 7 aprile 2021, <https://www.peikko.com/news/project-of-the-month-ricola-herb-center-laufen-switzerland/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Jenny Keller, Neue Zürcher Zeitung, *Un edificio in argilla per Laufen*, in “NZZ”, 15 febbraio 2013. <https://www.nzz.ch/ein-lehmbau-fuer-laufen-ld.844621>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Das neue Ricola Kräuterzentrum – Nachhaltigkeit und Spitzenarchitektur*, in “Ricola”, <https://isofloc.com/assets/Referenzen/Gewerbe-und-Industriebauten/187-PDF-2.pdf>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Il campus Alnatura a Darmstadt*, in “Alnatura”, <https://www.alnatura.de/de-de/ueber-uns/alnatura-campus/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Studio*, in “hass cook zemmrich – Studio 2050”, <https://www.haascookzemmrich.com/en/studio/>, (ultima consultazione agosto 2025).

- *Alnatura Campus Darmstadt / Germania*, in “hass cook zemmrich – Studio 2050”, <https://www.haascookzemmrich.com/en/projekte/alnatura-campus-en/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Thomas Wieckhorst, *L’Alnatura Campus di Darmstadt con la più grande facciata in terra battuta d’Europa*, in “bauhandwerk”, <https://www.bauhandwerk.de/artikel/bhw-alnatura-campus-in-darmstadt-mit-groesster-frei-bewitterter-stampflehmfassade-3605079.html>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *WAsp hub*, in “Wasp”, <https://www.3dwasp.com/en/wasp-hub/#hub>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Case stampate in 3D per salvare il mondo. Massimo Moretti racconta il progetto WASP*, in “BBS”, 4 dicembre 2018. <https://www.bbs.unibo.it/case-stampate-in-3d-per-salvare-il-mondo-massimo-moretti-racconta-wasp/#gref>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Maker economy starter kit*, in “WASP”, <https://www.3dwasp.com/en/maker-economy-starter-kit/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Alberto Chiusoli, *La prima casa stampata in 3D con la terra / Gaia*, in “In casa, Comunicati stampa”, 28 settembre 2018. https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/?utm_term=&utm_campaign=GLOBAL-en-SE-DSASito&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=3352968755&hsa_cam=16280182754&hsa_grp=139246202851&hsa_ad=583042531321&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-19959388920&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAtYy9BhB-cEiwANWQQL7j8bDeKqwaIARbdfpeK7Ifylt3xBBVO0wZkQqXBZQeg7taM4tV-qOhoCjkQQA_vD_BwE, (ultima consultazione agosto 2025).
- Sebastian Jordahn, *La casa Gaia stampata in 3D è realizzata con materiali biodegradabili*, in “dezeen”, 27 febbraio 2019. <https://www.dezeen.com/2019/02/27/gaia-wasp-3d-printed-house-biodegradable-video/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *WASP: Gaia*, in “earth architecture”, 15 ottobre 2024. <https://eartharchitecture.org/?p=1558>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Gaia, modulo abitativo stampato in 3D – WASP*, in “Arketipo”, 8 ottobre 2018. https://www.arketipomagazine.it/gaia-modulo-abitativo-stampato-in-3d-wasp/?utm_source=chatgpt.com, (ultima consultazione agosto 2025).
- *La ricerca e le tecnologie Mapei per TECLA*, in “MAPEI”, 4 novembre 2019. <https://www.mapei.com/it/it/news/dettaglio/2019/11/04/la-ricerca-e-le-tecnologie-mapei-per-tecla>,
- Collin anderson, *Detail: 3D-printed earthen structure of the TECLA prototype*, Ravenna, in “archello”, 23 ottobre 2023, <https://archello.com/news/detail-3d-printed-earthen-structure-of-the-tecla-prototype-ravenna>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Chiara Samorì, *Cucinella: “Ecco come il con il 3D abbiamo creato una casa in terra cruda”*, in “Ingegno”, 1° maggio 2021. <https://www.ingenio-web.it/articoli/cucinella-ec-co-come-con-il-3d-abbiamo-creato-una-casa-in-terra-cruda/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Il primo prototipo di abitazione ecosostenibile stampato in 3D in terra cruda*, in “MCA”, <https://www.mcarchitects.it/progetti/tecla-technology-and-clay>, (ultima consultazione agosto 2025).

Capitolo 4

Bibliografia

- Anna Gilibert, Roberto Mattone, *Terra: incipit vita nova – L'architettura di terra dalle origini al presente*, Torino, Castello del Valentino, 16 aprile 1997
- Scudo, Gianni et al. *Costruire con la terra: tecniche costruttive, campi di utilizzo e prestazioni*. Napoli: Sistemi Editoriali, 2001
- Maddalena Achenza, Ulrico Sanna, *Il manuale tematico della terra cruda, Tipografia del genio civile*, Sardegna, maggio 2009
- Galdieri, Eugenio. *Scritti sulla terra: esempi di architettura*. Il Prato, Roma, 2010.
- Bollini G., *Terra battuta: tecnica costruttiva e recupero, linee guida per le procedure d'intervento*, Edicom Edizioni, Monfalcone (Gorizia), 2013. <https://www.edicomstore.it/vetrina/terra-battuta-tecnica-costruttiva-recupero/>, (ultima consultazione agosto 2025)
- Minke, Gernot. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Third and revised edition. Basel, Switzerland: Birkhäuser, 2013
- Giorgi, Alessandro. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*. Aracne, Palermo, 2014
- P. Roberto, *Tecnologie per il recupero di costruzioni in terra battuta in Piemonte*, in "Doctoral thesis Polito", 2015, pag. 10. <https://hdl.handle.net/11583/2616409>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Michele Zampilli, *La terra cruda in ambito sismico*, Roma tre, 2018-19, https://www.academia.edu/39812543/La_terra_cruda_in_ambito_sismico, (ultima consultazione agosto 2025).
- Mario Cucinella, *Il futuro è un viaggio nel passato: dieci storie di architettura*, quodlibet Habitat, 2021.
- Ferretti, E.; Moretti, M.; Chiusoli, A.; Naldoni, L.; de Fabritiis, F.; Visonà, M. *Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing*. Materials 2022, 15, 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743> (ultima consultazione agosto 2025)

Sitografia

- S. Hannah, *Building with earth*, Dachverband Lehm e.V., july 2004, Weimar Germany. <https://www.dachverband-lehm.de/>, (ultima consultazione agosto 2025).
- Le case di terra in Europa, in "CED TERRA", <https://casediterra.com/web/le-case-terra-europa/>, (ultima consultazione agosto 2025)
- Diego Barbero, *Prova di compattazione Proctor: che cos'è e quando richiederla*, in "Studio geologico e geotecnico", 14 agosto 2019, <https://geologobarbero.it/prova-di-compattazione-proctor-che-cos-e-quando-richiederla/>, (ultima consultazione agosto 2025)
- Jean Dethier, *Abitare la terra: una nuova storia dell'architettura in terra cruda*, in "The Architectural Review", 31 gennaio 2020, <https://www.architectural-review.com/essays/inhabiting-the-earth-a-new-history-of-raw-earth-architecture>, (ulti-

ma consultazione agosto 2025).

• Capitolo 5

Bibliografia:

- Eugenio Galdieri, *Scritti sulla terra*, Saonara, Il prato, 1 gennaio 2010.
- Giorgi, A. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Aracne Editrice, Palermo, 2014.
- Dethier, Jean. *The Art of Earth Architecture: Past, Present, Future*. New York: Princeton Architectural Press, 2020.

Sitografia

- Jean Dethier, *Abitare la terra: una nuova storia dell'architettura in terra cruda*, in "architectural-review", 31 Gennaio 2020. <https://www.architectural-review.com/essays/inhabiting-the-earth-a-new-history-of-raw-earth-architecture>, (ultima consultazione agosto 2025).
- *Proposta di Legge Schirru*, in "CEDTERRA", <https://casediterra.com/web/proposta-legge-schirru/>, (ultima consultazione agosto 2025)
- Legge regionale 22/02/1997, n. 17, in "Regione Abruzzo", 11 ottobre 2019, <https://www2.regione.abruzzo.it/content/legge-regionale-22021997-n-17>, (ultima consultazione agosto 2025)
- Norme per la valorizzazione delle costruzioni in terra cruda, in "ARIANNA, banca dati normativa del Piemonte", 16 gennaio 2016, <http://arianna.cr.piemonte.it/iterlegcoordweb/dettaglioLegge.do?urnLegge=urn:nir:regione.piemonte:legge:2006;2@2025-05-21&tornaIndietro=true> (ultima consultazione agosto 2025)
- 2023-24 Lecture Series - Martin Rauch - Rammed Earth in Building Culture, presso Penn State Stuckeman School, <https://youtu.be/2oEKoXbNc3M?si=DV99xI9Z-9Lbh9NF> (ultima consultazione agosto 2025)
- Legge 24 dicembre 2003, n. 378, in "Disposizioni per la tutela e la valorizzazione dell'architettura rurale - CEDTERRA", <https://casediterra.com/web/category/legislazione-in-italia/leggi-in-vigore-nazionale/>, (ultima consultazione agosto 2025).

Conclusioni

Bibliografia

- Giorgi, A. *Guida pratica alle costruzioni in terra cruda*, Aracne Editrice, Roma, 2014, pag.VIII

Sitografia

- Alessandro Severi, *Itaca: la casa autosufficiente ed ecosostenibile stampata in 3D*, in "WASP", 11 ottobre 2022. <https://www.3dwasp.com/itaca-la-casa-autosufficiente-ed-ecosostenibile-stampata-in-3d/>, (ultima consultazione agosto 2025).

