



Politecnico di Torino
Corso di Laurea Magistrale
in Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

La paglia negli interventi di riqualificazione

Febbraio 2020

Relatori:
Elena Piera Montacchini
Maria Cristina Azzolino
Angela Lacirignola

Beatrice Piccirillo

a.a. 2019/2020

*A mamma, papà
e nonna Giovanna*

INDICE

Premessa p. 8

Efficienza energetica e riqualificazione p. 10

Verso uno sviluppo sostenibile	p. 13
La presa di coscienza del settore edilizio	p. 23
Il dibattito sul risparmio energetico in edilizia	p. 39
I provvedimenti: il quadro normativo europeo	p. 45
I provvedimenti: il quadro normativo italiano	p. 48
Perché riqualificare?	p. 57
Intervenire sull'involucro	p. 68

L'impiego della paglia in architettura p. 72

La paglia come materiale da costruzione	p. 76
Le proprietà fisiche della paglia	p. 86
Perché la paglia?	p. 96
Tra nuova costruzione e riqualificazione: tecniche costruttive	p. 97
Esperienze nel mondo	p. 139
Butler's house	p. 140
Whitty's House	p. 148
Calkin's House	p. 154
Yannik Mollin House	p. 160
Scuola materna e primaria "Montessori"	p. 166
Wihan's house	p. 174
House Simma	p. 182
L'esperienza Italiana	p. 186
Riqualificazione cascina piemontese	p.188
Riqualificazione edificio residenziale	p. 194
Recupero edificio industriale	p. 198
Casa Turollo	p.204
Casa Rinaudi	p.206

La paglia: opinioni e prospettive p.212

Il punto di vista delle persone non specializzate:	
risultati del questionario on-line "La paglia in architettura"	p.216
Strutturazione dell'indagine	p.216
Risultati	p.218
Conclusioni	p.231
Il punto di vista dei professionisti:	
risultati del questionario on-line "La paglia in architettura"	p. 232
Strutturazione dell'indagine	p.232
Risultati	p.234
Conclusioni	p.245
L'opinione degli esperti del settore:	
l'esito delle interviste dirette	p.246
Strutturazione delle interviste	p.246
Interviste	p.249
Risultati e conclusioni	p.278

Misure in campo e simulazioni p.284

La misura della trasmittanza termica in opera	p.288
Il metodo del termoflussimetro	p.290
Casa Muratore, Alba (TO)	p.304
La campagna di misure	p.311
La trasmittanza termica misurata	p.314
La trasmittanza termica calcolata	p.318
Confronto trasmittanza misurata e trasmittanza calcolata	p.319
Casa Cembo	p.320
La campagna di misure	p.325
La trasmittanza termica misurata	p.328
La trasmittanza termica calcolata	p.332
Confronto trasmittanza misurata e trasmittanza calcolata	p.333

Conclusioni p.334

Bibliografia p.340

Abstract

Preso atto della situazione climatica in cui verte il nostro pianeta, oggi, ci troviamo immersi nel dibattito sulla sostenibilità nel quale l'architetto, in quanto tecnico, è direttamente coinvolto: il settore edile è responsabile del 30% del consumo di energia e del 28% delle emissioni di CO₂ a livello mondiale. In Italia, questo scenario si presenta accentuato a causa delle mediocri caratteristiche prestazionali del patrimonio edilizio esistente, la maggior parte del quale costruito nell'ambito del processo espansivo che ha interessato il mercato edilizio agli arbori del boom economico, che oggi necessita di immediati interventi di recupero. Tale situazione spinge alla ricerca di nuove soluzioni, tecnologicamente ed energeticamente lontane ma allo stesso tempo più performanti rispetto a quelle che siamo abituati a vedere e che hanno caratterizzato l'edilizia italiana fino alla fine del secolo scorso. Si parla di materiali naturali, salubri, con elevate caratteristiche prestazionali, ridotte emissioni di CO₂ durante l'intero ciclo di vita, ridotta energia grigia, in grado di apportare benefici all'uomo e all'ambiente. Il contributo, nell'ottica appena descritta, ha l'obiettivo di valutare l'impiegabilità della paglia negli interventi di riqualificazione indagandone le potenzialità e le criticità, attraverso lo studio della letteratura esistente sulle costruzioni in paglia, interviste e verifiche prestazionali in campo.

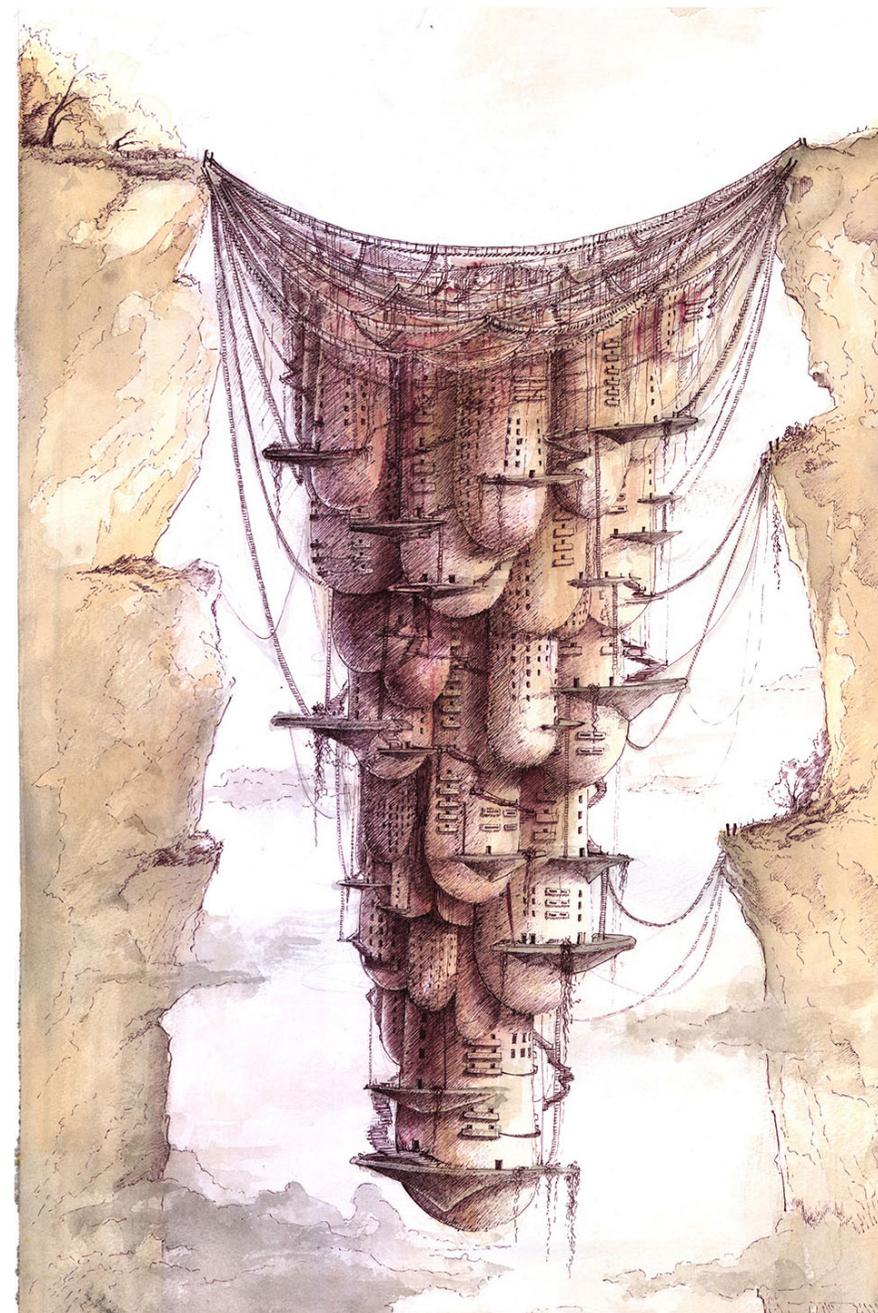
Taking note of the climatic situation that concerns our planet today, we are compelled to focus our attention on sustainability in which the architect, as a specialist, is directly involved, considering that the construction sector is responsible for 30% of energy consumption and 28% of CO₂ emissions worldwide. In Italy, this scenario is accentuated due to mediocre performance characteristics of the existing buildings, most of which were built during the expansion process that involved the construction market at the beginning of the economic boom and therefore now need urgent restoration. This situation leads us to look for new technological and energetic solutions, but at the same time better performing than those we are used to seeing and which characterized Italian construction until the end of last century. Today we talk about natural and healthy materials, with high performance characteristics, reduced CO₂ emissions during the entire life cycle, reduced embodied energy, able to bring benefits to man and environment. This thesis, from the viewpoint just described, aims to appraise the use of straw in redevelopment interventions by investigating its potential and critical issues, through the study of existing literature on straw constructions, interviews and performance tests in situ.

Premessa

Il presente lavoro di tesi nasce dalla riflessione a proposito delle attuali e preoccupanti condizioni ambientali, indicatori di un pianeta al limite. Come in *Ottavia*, viviamo all'ombra di un futuro incerto: abitiamo edifici energivori, tasselli di una città appesa ad un filo. L'impatto del settore delle costruzioni è rilevante, soprattutto in termini di consumo delle risorse e ricadute sull'ambiente, per cui sono necessarie misure urgenti: nuove tecnologie e materiali naturali al fine di concedere una seconda possibilità al patrimonio edilizio esistente.

L'obiettivo del presente elaborato è valutare l'impiegabilità della paglia negli interventi di riqualificazione. Il primo capitolo riporta, sinteticamente, il discorso sulla sostenibilità che si è instaurato a partire dagli ultimi decenni del '900, passando per accordi internazionali e normative per poi concentrarsi sulla qualità del patrimonio edilizio italiano e sul concetto di riqualificazione. Il secondo capitolo ha lo scopo di introdurre, in primis, la paglia come materiale da costruzione e successivamente, si vuole comprendere in che modo questo materiale può essere utilizzato in ambito edilizio e come, fino ad oggi, è stato impiegato in casi reali di riqualificazione. Nel terzo capitolo si riportano le indagini svolte nell'intento di analizzare sia l'opinione dei soggetti coinvolti riguardo le costruzioni in paglia che per approfondire le modalità di impiego della paglia negli interventi di riqualificazione e, al termine del capitolo, si riportano le prime considerazioni. Si è scelto di operare attraverso due strumenti (questionario on-line e intervista diretta) e su tre livelli, coinvolgendo soggetti diversi: il questionario è rivolto a persone non specializzate e professionisti che non utilizzano quotidianamente la paglia, mentre l'intervista diretta è dedicata agli specialisti del settore delle costruzioni in paglia. Con il quarto capitolo si vuole indagare la risposta di questa soluzione tecnologica dal punto di vista energetico riportando gli esiti delle misure di trasmittanza termica in opera e, confrontando i valori misurati con i valori ricavati tramite le simulazioni termoigrometriche, si operano le riflessioni finali.

Nella pagina accanto: Rappresentazione di Giulia Gherardi, svolta nel corso di Disegno dell'Architettura B, Docente Maria Grazia Cianci, Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi Roma Tre, a.a.2013-2014.



"C'è un precipizio in mezzo a due montagne scoscese: la città è sul vuoto, legata alle due creste con funi e catene e passerelle. Sospesa sull'abisso la vita degli abitanti d'Ottavia è meno incerta che in altre città. Sanno che più di tanto la rete non regge."

Le città invisibili, Italo Calvino.

EFFICIENZA ENERGETICA
E RIQUALIFICAZIONE

Verso uno sviluppo sostenibile

«Ogni cosa che utilizziamo, e che esce da una fabbrica, contiene necessariamente al suo interno un “carico” energetico invisibile: quello che è stato necessario per produrla. Osservando il sistema dall’alto, ci si rende conto che tutta la nostra vita galleggia su una fittissima rete di energia che collega ogni attività, ogni prodotto, ogni servizio e senza la quale tutto ciò che vediamo intorno a noi crollerebbe.»

Angela, Piero e Lorenzo Pinna, *La sfida del secolo. Energia*, Milano: Mondadori, 2008.

Come è noto, l’Italia non è un Paese ricco di fonti energetiche. Ma fino alla prima metà del 1900 quelle poche riserve di gas e petrolio presenti sul territorio nazionale, e una modesta produzione di energia proveniente da centrali idroelettriche e dai sistemi geotermici riuscivano a coprire il 50% del fabbisogno energetico nazionale.

Ma ci volle poco a rivoluzionare questo equilibrio:

«Nel giro di soli 10 anni, fra il 1960 e il 1970, succede un fatto nuovo: la richiesta di energia si moltiplica per due volte e mezzo. È l’Italia del “miracolo economico”, del benessere, del cosiddetto “consumismo”, dell’automobile, del frigorifero, della lavatrice, del riscaldamento in tutte le case, delle vacanze e di tante altre comodità prima impensabili»¹.

Il crescente bisogno di energia sfociò nella crescita delle importazioni e di conseguenza nella dipendenza da Paesi produttori della fonte

¹ Angela, Piero e Lorenzo Pinna, *La sfida del secolo. Energia*, Milano: Mondadori, 2008.

primaria di energia: il petrolio.

La situazione mondiale non risultava molto diversa da quella italiana: «Tra il 1955 e il 1970 in Giappone il peso del petrolio sui consumi energetici totali era passato dal 22,9% al 74,1%, per arrivare all'80,4% nel 1973. Si trattava di petrolio interamente proveniente dall'estero per più dell'80% dal Medio Oriente. Nello stesso periodo in Europa occidentale le importazioni petrolifere erano passate dal 24,4% al 62,7% dei consumi energetici complessivi, per arrivare al 64,5% nel 1973. Anche negli Stati Uniti il peso delle importazioni petrolifere sul totale dei consumi energetici crebbe, sia pure più moderatamente [...] passando dal 7% del 1955 al 10,9% del 1970, per balzare al 18,1% nel 1973»².

A partire dal 1890 la produzione di petrolio a livello mondiale crebbe di anno in anno, permettendo la crescita galoppante dell'economia mondiale soprattutto per alcuni Paesi.

In figura 1 sono riportati i consumi energetici a livello mondiale e per Paesi riferiti all'anno 1974 e i relativi saggi di incremento considerando un periodo che va dal 1955 al 1973. Emerge che i Paesi industrializzati consumavano i 5/6 dell'energia consumata a livello globale, e in particolare gli Stati Uniti ne utilizzano quasi i 2/3. Inoltre, tra i saggi di incremento più alti vi sono Paesi Bassi, Italia e Giappone rispettivamente con circa 2, 3 e 5 punti percentuali superiori alla media mondiale (5,1%). La maggior parte dei giacimenti petroliferi si trovava in Medio Oriente e nel Nord Africa, ed erano gestiti da grandi compagnie che riuscirono a far fronte all'aumento della domanda assicurando prezzi stabili e relativamente bassi. Inoltre, scrive Maugeri: «il tratto distintivo dell'età dell'oro' del petrolio è proprio la sovrapproduzione»³.

In Medio Oriente il petrolio veniva estratto a prezzi molto competitivi rispetto ad altre aree del mondo, come i giacimenti in Texas e Venezuela. Questi Paesi, che dal 1960 si riconoscono sotto l'acronimo OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries), «possedevano i 2/3 delle riserve mondiali e producevano il 90% del

2 Petrini, Francesco, *Imperi del profitto. Multinazionali petrolifere e governi nel XX secolo*, Milano: Franco Angeli, 2015.

3 Maugeri, Leonardo, *L'era del petrolio: Mitologia, storia e futuro della più controversa risorsa del mondo*, Milano: Feltrinelli, 2006.

	Consumi nel 1974 [Mtep]	Saggio aumento 1955-1974 [% anno]	Consumi pro-capite nel 1974 [tep/abitante]
Mondo	6.000	5,1	1,52
Belgio-Lussemburgo	49	3,6	4,83
Francia	178	5,1	3,39
Repubblica federale tedesca	258	4,2	4,16
Italia	136	8,3	2,44
Paesi bassi	68	7,4	5,02
Danimarca	21	5,4	4,16
Regno Unito	226	1,5	4,04
Irlanda	7	5	2,27
Cee (9 paesi)	945	4,1	3,66
USA	1.771	3,7	8,36
Canada	206	5,1	9,16
Giappone	344	10,6	3,14
Urss	938	5,4	3,72
Paesi comunisti europei (esclusa Urss)	376	4,4	3,48
Europa (esclusa Urss)	1.588	4,4	3,1
Paesi industrializzati	4.920	4,6	4,37
Paesi in via di sviluppo	1.080	8,7	0,38

Fig.1 Consumi energetici nel 1974 (in Mtep); saggio medio annuo di aumento dei consumi nel periodo 1955-73; Consumi pro-capite nel 1974 (in tep/abitante).
Fonte: Gerelli, Emilio e Luigi Bernardi, *È possibile in Italia una politica dell'energia?*, Milano: Franco Angeli, 1977.

greggio immesso nei traffici internazionali»⁴. In particolare, i Paesi arabi membri dell'OPEC, «detenevano la metà delle risorse petrolifere globali e fornivano il 60% del greggio che affluiva sul mercato internazionale»⁵.

Il Medio Oriente divenne per ovvie ragioni il maggiore esportatore di petrolio: l'Europa acquistava da esso l'80% del petrolio consumato, il Giappone il 74% e gli Stati Uniti il 40%.

Inoltre, con il crescere della domanda e delle esportazioni, crebbe anche la volontà dei Paesi dell'OPEC di esercitare maggior controllo sui prezzi e sulle quantità di petrolio estratte ed esportate.

Si arrivò così agli arbori degli anni '70, dove la produzione di energia a livello mondiale dipendeva quasi totalmente dagli idrocarburi, in parte dal carbone e marginalmente dalle fonti energetiche rinnovabili.

Come scrive Maugeri:

«È la fase più lunga e stabile di prezzi bassi mai sperimentata dall'industria petrolifera, e la disponibilità in abbondanza di una fonte energetica così economica, efficiente e versatile si rivela decisiva per il più spettacolare balzo in avanti nella storia dell'economia mondiale, permettendo un miracolo economico che altrimenti non sarebbe stato possibile»⁶.

Questo periodo di prosperità giunse al termine quando, all'inizio degli anni '70, esplose la guerra in Kippur. L'esercito egiziano e l'esercito siriano invasero i territori d'Israele, uno dei maggiori produttori dell'«oro nero», ma il tempestivo intervento di Stati Uniti e Unione Sovietica riuscì a porre fine al conflitto seppur con alcune conseguenze. I paesi dell'OPEC (Emirati Arabi Uniti, Arabia Saudita, Kuwait, Iraq, Iran, Qatar, Venezuela, Nigeria, Libia, Algeria, Indonesia) decisero di

4 Bucarelli, Massimo, *L'ENI e il petrolio dell'Iraq negli anni settanta: tra crisi energetiche e nazionalismo arabo*.

https://www.academia.edu/12000853/L_ENI_E_IL_PETROLIO_DELL_IRAQ_NEGLI_ANNI_SETTANTA_TRA_CRISI_ENERGETICHE_E_NAZIONALISMO_ARABO?email_work_card=view-paper

5 *Ibidem*

6 Maugeri, Leonardo, *L'era del petrolio: Mitologia, storia e futuro della più controversa risorsa del mondo*, Milano: Feltrinelli, 2006.

Giacimento	Dimensione [milioni tonn.]	Anno di ritrovamento	Nazione
Ghawar	11.350	1948	Arabia Saud.
Burgan	9.850	1938	Arabia Saud.
Bolivar Coastal	4.400	1917	Venezuela
Safaniya-Khafji	4.100	1951	Ar. S./Zona neut.
Rumaila	2.750	1953	Iraq
Ahwaz	2.400	1958	Iran
Kirkuk	2.200	1927	Iraq
Marun	2.200	1964	Iran
Gach Saran	2.100	1928	Iran
Agha Jari	1.900	1938	Iran
Samotlor	1.800	1966	Urss
Abqaiq	1.700	1940	Arabia Saud.
Fereidoon-Marjan	1.350	1966	Iran/Arabia S.
Prudhoe Bay	1.300	1968	Stati Uniti
Qatif	1.250	1945	Arabia Saud.
Romashkkino	1.700	1948	Urss
Berri	1.650	1964	Arabia Saud.
Zakum	1.650	1964	Abu Dhabi
Manifa	1.500	1957	Arabia Saud.
Bu Hasa	1.250	1962	Abu Dhabi
Sarir	1.000	1961	Libia
Khurai	1.150	1957	Arabia Saud.
Zuluf	1.150	1965	Arabia Saud.
Raudhatain	1.050	1955	Kuwait
Hassi Messaoud	1.000	1956	Algeria
Shaybah	1.000	1968	Arabia S/Abu Dhabi
Abu Sa'fah	900	1963	Arabia Saud.
Bab	800	1954	Abu Dhabi
Ta-ch'ing	800	1959	Cina
Asab	800	1965	Abu Dhabi

Fig. 2 Principali giacimenti di petrolio nel mondo al 1978.

Fonte: Nehring, Richard, *Giant Oil Fields and World Oil Resources*, Rand Corporation ' Santa Monica ' California, 1978 in Nannei, Alessandra, *L'Italia oltre la crisi energetica*, Milano: Arnoldo Mondadori Editore, 1981.

aumentare i prezzi del greggio del 70% per colpire le nazioni che appoggiavano Israele.

La situazione precipitò bruscamente quando l'America decise di fornire un aiuto sostanziale ad Israele, così il giorno dopo Libia e Arabia Saudita proclamarono l'embargo: le navi cariche di petrolio in partenza per gli Stati Uniti vennero bloccate. In poco tempo anche gli altri paesi dell'OPEC faranno lo stesso.

Ma le limitazioni delle esportazioni di petrolio non sono destinate a colpire solo l'America, infatti dopo poco tempo furono estese anche all'Europa: i Paesi industrializzati non poterono più importare la quantità di petrolio di cui necessitavano.

Come spiega Nannei:

«Le conseguenze per l'Europa [...] furono particolarmente gravi, perché durante gli anni '60 in alcuni Paesi, come la Francia e la Gran Bretagna, il basso prezzo del petrolio aveva indotto le autorità governative a chiudere le miniere di carbone, il cui sfruttamento non era più conveniente dati gli alti costi di estrazione. Pertanto nel periodo del "petrolio facile", il consumo di petrolio dell'Europa occidentale era aumentato di quasi sette volte, mentre il consumo totale di energia era poco più che raddoppiato»⁷.

Fu così che un'ondata di crisi investì l'Europa, non solo economicamente ma anche politicamente. Autostrade deserte, treni fermi, industrie paralizzate, illuminazione ridotta, scuole chiuse, case ghiacciate. Di conseguenza i Paesi consumatori dovettero adottare misure restrittive dei loro consumi interni.

L'Olanda fu il primo Paese a prendere provvedimenti vietando alle automobili di circolare la domenica, imponendo la riduzione del riscaldamento negli edifici pubblici e residenziali e il razionamento della benzina. Seguì la Danimarca introducendo dei limiti alla velocità delle auto (30 km/h in città e 80 km/h sulle strade extraurbane). In Inghilterra il governo varò un piano di razionamento per il riscaldamento, la circolazione automobilistica e la pubblicità luminosa. In

⁷ Nannei, Alessandra, *L'Italia oltre la crisi energetica*, Milano: Arnoldo Mondadori Editore, 1981.



Fig. 3 Cartello esposto presso un distributore di benzina esausto.
Fonte: qualenergia.it



Fig. 4 Auto in coda in una stazione di benzina a Southwark, Londra, nel novembre 1973.
Fonte: panorama.it

Francia si invita la popolazione a fare economia di carburante e abbassare il riscaldamento nelle abitazioni.

L'Italia, il cui fabbisogno energetico dipendeva in larga parte dal petrolio mediorientale, risulta tra i Paesi che più risentirono della crisi. Di conseguenza l'allora presidente del consiglio Mariano Rumor decise di attuare, nel dicembre del 1973, la politica dell'*austerità* che impose il divieto di circolazione delle automobili la domenica, la chiusura anticipata a prima della mezzanotte di teatri, cinema, bar e discoteche, e infine illuminazione pubblica erogata a basso regime. Come spiega ancora Nannei: «*questa serie di limitazioni portarono, da un lato, alla riduzione dell'11,3% dell'energia consumata, e dall'altro ad una recessione che non si vedeva dalla fine della seconda guerra mondiale*»⁸.

La prima crisi energetica sottolineò la dipendenza del mondo occidentale dai Paesi arabi, e per far fronte a questa situazione gli stati si impegnarono in varie direzioni: promossero la diversificazione delle fonti energetiche considerando per la prima volta anche quelle rinnovabili ed incentivarono la ricerca scientifica e tecnologica, ma ciò non fu sufficiente.

Nel 1979 una seconda crisi energetica scosse il mondo occidentale. Quest'ultima vide come protagonista lo stato iraniano prima con la rivoluzione iraniana e successivamente con la guerra contro l'Iraq. Questi eventi portarono ad una riduzione della produzione di petrolio provocando un deficit di circa due milioni di barili al giorno e il conseguente aumento dei prezzi:

«L'Iran produceva circa il 14% del petrolio esportato dall'OPEC, ma a seguito della crisi la produzione venne ridotta dell'82% e poi del 31% durante i primi mesi del 1979 e le esportazioni cessarono. Nonostante i restanti membri dell'OPEC maggiorarono le esportazioni, l'aumento del prezzo del petrolio fu inevitabile. [...] Poco dopo, nel 1980, a seguito della guerra tra Iran e Iraq, quest'ultimo (con una produzione pari al 7% sul totale del petrolio esportato dall'OPEC) sospende le

⁸ *Ibidem*

esportazioni »⁹.

Sono trascorsi pochi anni ma la situazione rimane invariata, gli equilibri economici mondiali non dipendono più dai Paesi consumatori né dalle grandi compagnie petrolifere ma, ancora una volta, da «*un cartello di paesi produttori ed esportatori, prevalentemente arabi. In pochi anni, si era verificato un passaggio di potere a tutto vantaggio dei membri dell'OPEC*»¹⁰.

Le due crisi petrolifere degli anni '70 chiusero un lungo periodo in cui l'energia a buon mercato era vista come risorsa inesauribile anche quando si usavano fonti non rinnovabili.

Dopo un periodo iniziale in cui i governi si attivarono per ridurre i consumi si succedette un secondo periodo, che proseguì anche oltre il periodo di crisi. Era necessario ricercare altre fonti di energia, diversificare le fonti energetiche, per ridurre la dipendenza dai Paesi detentori del petrolio e in modo da non piombare in una situazione di crisi al primo segnale di carenza di petrolio. Tutto il mondo, ma soprattutto l'Occidente si rese conto che si stava vivendo una situazione politica ed economica governata da fragili equilibri.

Si investì nella ricerca scientifica e tecnologica e, più di tutti, il nucleare veniva considerata la migliore fonte energetica alternativa. Inoltre, iniziavano a diffondersi, seppur più lentamente, le energie rinnovabili.

Un aspetto positivo della crisi è che porta all'introduzione di nuove parole, che divennero il simbolo di quell'epoca: per la prima volta si parla di ecologia, di risparmio energetico, di rispetto per l'ambiente e di sostenibilità.

Testimoni del fatto che qualcosa stava cambiando sono l'introduzio-

⁹ *Ibidem*

¹⁰ ASENI, FE, Presidenza Raffaele Girotti, b.127, f. 3717, Situazione e prospettive dell'industria energetico-petroliera, cit. Sui cambiamenti del mercato petrolifero e sul consolidarsi di un sistema dei prezzi controllato dall'OPEC, si vedano le considerazioni in B. FATTOUH, An Anatomy of the Crude Oil Pricing System, in «World Petroleum Market», The Oxford Institute for Energy Studies - Working Papers, n. 40, Gennaio 2011, pp. 14-17. In Bucarelli, Massimo, *L'ENI e il petrolio dell'Iraq negli anni settanta: tra crisi energetiche e nazionalismo arabo*.

ne degli standard di efficienza energetica per gli autoveicoli e per gli elettrodomestici e una nuova attenzione nei confronti del dispendio energetico in edilizia.

Il passaggio improvviso dall'era della sovrabbondanza a quella delle limitazioni stava imprimendo una svolta agli equilibri economici e politici del pianeta.

Ma non sono solo questi ultimi a modificarsi in quanto oltre ai comportamenti sta mutando la psicologia delle persone: iniziano a prendere coscienza di quanto la loro vita sia condizionata da questa materia prima.

La presa di coscienza del settore edilizio

«Per decine di secoli i nostri antenati hanno pensato e realizzato “pezzi di città” mentre dai primi decenni del secolo scorso siamo solamente stati capaci di realizzare dei “frammenti di periferie”, con abitazioni che producono inquinamento out e indoor e sono state realizzate con materiali inappropriati tanto da richiedere troppa energia per assicurarne il comfort interno. Queste nuove espansioni paiono quindi disgiunte dall'antico abitato: prive di una qualsivoglia preesistenza che a esso le riconduca; mancanti di quelle specificità, di quelle caratteristiche proprie non riscontrabili in altre parti, come l'inflessione dialettale, le variazioni rispetto alla cucina tipica regionale e i suoi luoghi geografici, sia che siano monumenti o semplici luoghi di aggregazione.»

Bertolini, Nando (a cura di), *Bioarchitettura: le tesi di Ugo Sasso dalle parole ereditate sulla via italiana del costruire sostenibile*, CLEAN, Napoli, 2016.

Gli anni del “miracolo economico” si sono ripercossi anche nel settore delle costruzioni, infatti:

«il settore del riscaldamento per usi civili offre uno spunto assai significativo della variazione strutturale che è avvenuta negli usi e costumi energetici del paese. I consumi energetici per il riscaldamento degli ambienti domestici sono passati da 3×10^6 tep nel 1953 a $18,1 \times 10^6$ tep nel 1973, con un tasso medio annuo di crescita del 9,4% a fronte di una

crescita media del numero di abitazioni di appena 1,7%»¹¹.

Ma questa crescita considerevole dei consumi ha radici più profonde. Si deve, in primis, alla grande migrazione interna che ha avuto inizio dopo la fine della seconda guerra mondiale per raggiungere l'apice negli anni '60. Si assistette ad un massiccio trasferimento dalle zone rurali del Sud dell'Italia alle città industriali del Nord, nella speranza di un lavoro migliore: «tra il 1947 e il 1950 l'8,2% della popolazione ha dovuto spostarsi da una città all'altra, nel 1961 la quota sale al 36%, mentre nel 1971 si raggiunge il 50-60%»¹².

Come spiega Preite:

«La mobilità anagrafica trova coerente riscontro nell'evoluzione della struttura occupazionale del Paese; il calo considerevole della percentuale di addetti nell'agricoltura sul totale della popolazione attiva [...] non solo testimonia il passaggio della nostra economia da condizioni di arretratezza verso un sistema produttivo più avanzato in analogia con gli altri Paesi a capitalismo maturo, ma ci consente di dare anche una direzione all'entità dei movimenti anagrafici considerati: spopolamento delle campagne e crescita urbana, col progressivo addensamento nelle città di risorse umane e fattori produttivi sono diversi aspetti di un unico processo»¹³.

Come conseguenza della grande migrazione interna si ebbe che un gran numero di persone passarono dall'uso sporadico dei sistemi di riscaldamento tradizionali (prevalentemente stufe e camini), poiché situati solo negli ambienti principali delle abitazioni e utilizzati solo nei momenti in cui si sta in casa, ad una situazione in cui l'impianto di riscaldamento diviene centralizzato e di conseguenza non vincolato dalla temperatura esterna e acceso anche nei momenti in cui gli alloggi sono vuoti.

Inoltre, in seguito al boom economico e all'innalzamento dei redditi

11 Gerelli, Emilio e Luigi Bernardi, *E' possibile in Italia una politica dell'energia?*, Milano: Franco Angeli, 1977.

12 Golini, Antonio, *Distribuzione della popolazione, migrazioni interne e urbanizzazione in Italia*, Istituto di Demografia, Roma, 1974.

13 Preite, Massimo, *Edilizia in Italia dalla ricostruzione al piano decennale*, Firenze: Vallecchi, 1979.

Censimento	1951	1961	1971
Popolazione comuni urbani (x 1000)	13.203	16.915	20.126
% popolazione tot.	28%	33%	37%
Popolazione comuni non urbani (x 1000)	34.314	34.708	34.557
% popolazione tot.	72%	67%	63%

Fig.5 Popolazione residente nei comuni urbani e non urbani ; numero di comuni per classe d'ampiezza.

Fonte: dati Istat in Preite, Massimo, *Edilizia in Italia dalla ricostruzione al piano decennale*, Firenze: Vallecchi, 1979.

Censimento	1951	1961	1971
Popolazione attiva:			
Agricoltura	8.261	5.693	3.243
% su tot. pop. attiva	42%	29%	17%
industria	6.290	7.963	8.350
% su tot. pop. attiva	32%	41%	44%
Altre attività	5.026	5.936	7.238
% su tot. pop. attiva	26%	30%	38%
Tot. popolazione attiva	19.577	19.592	18.831
% sul totale	41%	39%	35%
Popolazione non attiva	27.939	31.032	35.306
% sul totale	59%	61%	65%
Popolazione totale	47.516	50.624	54.137

Fig. 6 Popolazione residente attiva e non attiva; popolazione per settore di attività economica. (I dati sono espressi in migliaia)

Fonte: dati Istat in Preite, Massimo, *Edilizia in Italia dalla ricostruzione al piano decennale*, Firenze: Vallecchi, 1979.

familiari, coloro che risiedevano già all'interno delle città decisero di cambiare il modo di riscaldare le proprie abitazioni sostituendo stufe e camini con sistemi centralizzati, alimentando così l'incremento dei consumi.

Ultimo motivo che può spiegare il suddetto aumento dei consumi è relativo ai danni al patrimonio edilizio italiano subiti nella seconda guerra mondiale che si sommano «ad una situazione di già acuta insufficienza di alloggi qual era quella d'anteguerra nel Paese»¹⁴.

A partire dal 1948 e grazie al supporto della legge n.154/1945 relativa ai piani di ricostruzione si dà il via ad un proficuo periodo per il settore delle costruzioni «che in breve tempo vede la formazione di un ampio panorama edilizio mirato a rispondere all'impellente esigenza di nuovi e numerosi alloggi, a scapito di un disegno urbanistico organico»¹⁵.

Ma non ci sono solo aspetti positivi in questa situazione: presi dall'impeto del costruire senza freni si è smarrito il disegno generale delle città.

Come spiega Preite:

«I piani di ricostruzione si sono così trasformati in un alibi per non affrontare una reale pianificazione urbana. Non solo hanno fatto perdere tempo prezioso all'inizio, quando più facile sarebbe stato porre le basi per uno sviluppo diverso delle nostre città, ma, protraendosi ben al di là delle normali scadenze di legge grazie a successive proroghe, hanno di fatto ostacolato l'adozione degli ordinari strumenti urbanistici di legge»¹⁶.

Gli esiti della ricostruzione a partire dalla fine della seconda guerra mondiale e successivamente la migrazione interna e l'incremento dei redditi familiari ha provocato un'espansione del settore edilizio senza precedenti, portando alla costruzione di gran parte degli edifici che oggi compongono le nostre città.

Dal punto di vista quantitativo, tra il 1951 e il 1971, gli edifici costruiti sul territorio italiano passano da 11.662.000 a 17.447.000, con

¹⁴ *Ibidem*

¹⁵ *Ibidem*

¹⁶ *Ibidem*

	Zona geografica				Totale
	Nord Ovest	Nord Est	Centro	Sud	
Campione edifici (000 in V.A.)	1595.2	1594.9	1282.0	1816.5	7144.3
Età:					
prima del 1851	19,5%	20,4%	22,5%	8,8%	16,2%
dal 1851 al 1890	24,4%	13,5%	15,3%	22,2%	17,8%
dal 1891 al 1920	16,8%	24,0%	16,8%	23,5%	21,2%
dal 1921 al 1940	16,8%	17,3%	23,7%	23,0%	21,6%
dal 1941 al 1961	9,2%	12,3%	13,5%	9,7%	11,3%
dal 1962 al 1965	6,5%	6,2%	4,2%	4,7%	6,0%
dal 1966 al 1969	4,0%	3,6%	2,8%	4,9%	4,0%
dal 1970 al 1971	2,8%	2,7%	1,2%	1,2%	2,8%

Fig. 7 Distribuzione del patrimonio edilizio per età e per zona geografica. Fonte: CRESME, *La riqualificazione edilizia: Condizioni e problemi del patrimonio esistente attraverso il rapporto tra «nuovo» e «usato» nel mercato edilizio italiano*, Milano: Giuffrè, 1975.

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Tipo di struttura portante:						
Muratura laterizio	18,8	42,9	19,6	1,9	1,7	22,1
Muratura pietrame	0,6	1,9	8,6	26,1	17,1	8,9
Cemento armato	72,4	34,4	50,3	63,1	75,2	54
Ferro	0	0,3	0	0	0	0,1
Misto	8,2	20,5	21,5	8,9	6	14,9

Fig. 8 Fabbricati per tipo di struttura portante. Ripartizione per grandi zone geografiche. Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

un incremento del 49,6%. È presente però un divario evidente tra le regioni settentrionali che tendenzialmente superano la media italiana (Liguria 78,4%, Lombardia 61,2%) e le regioni meridionali che rimangono sotto la media (Abruzzo e Molise 20,3%, Basilicata 21%, Calabria 18%).

Per indagare, dal punto di vista qualitativo, il patrimonio edilizio presente sul territorio italiano negli anni '70, si prendono a riferimento alcune indagini svolte dal *Centro di Ricerche Economiche Sociologiche e di Mercato nell'Edilizia* (CRESME). Quest'ultimo ha promosso nel 1963 un'indagine campionaria su 1000 fabbricati allo scopo di mettere in luce le più importanti caratteristiche dei fabbricati residenziali ultimati in Italia nel 1962.

Come già ampiamente detto e visibile in figura 7, buona parte del patrimonio edilizio italiano è stato costruito negli anni del dopoguerra e fino ai primi anni '70 si è mantenuto lo stesso andamento, suppur con delle piccole discrepanze tra Nord e Sud.

Per ricreare il profilo di un edificio tipo costruito a cavallo della seconda metà del '900 in Italia si può far riferimento alle tabelle elaborate dal CRESME e pubblicate nel volume *La riqualificazione edilizia* (1975).

Per quanto riguarda la struttura portante si evince che per circa la metà degli edifici italiani si utilizza il cemento armato, ma sussistono alcune differenze tra Nord e Sud. Al Nord si prediligono anche altri sistemi per la realizzazione della struttura portante come murature in laterizio e sistemi misti laterizio-cemento, mentre al Sud si utilizza quasi esclusivamente il cemento armato e in minima parte la pietra.

Per i tamponamenti, facendo riferimento all'intero territorio italiano, si usano in prevalenza mattoni pieni, mattoni forati e tufo. Nelle regioni settentrionali sono maggiormente diffusi mattoni pieni e forati, d'altro canto nell'Italia meridionale (soprattutto in Sicilia) è molto diffuso l'uso del tufo, mentre mattoni pieni e mattoni forati sono impiegati marginalmente.

Prendendo in considerazione l'isolamento termico si nota che la maggior parte degli edifici italiani (66%) non risulta coibentata. La situazione rispetto alla media nazionale migliora al Nord dove circa la metà dei fabbricati risulta termicamente isolata, ma peggiora

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Materiali utilizzati per la muratura piena di tamp.:						
Mattoni pieni	17,3	40,9	45,4	3,7	28,1	29,5
Mattoni forati	69,2	35,5	16,4	20,4	3,1	29
Tufo	0	0,9	10,9	50	64	22,4
Pomice	0	0,9	0	0	1,6	0,6
Matt. pieni e forati	0	2,7	1,8	1,8	0	1,5
Matt. pieni e manufatti di cemento	13,5	18,2	25,5	1,8	0	12,5
Matt. pieni, forati, tufo e pomice	0	0,9	0	0	1,6	0,6
Tufo e pomice	0	0	0	16,7	1,6	3
Matt. pieni e tufo	0	0	0	5,6	0	0,9

Fig. 7 Fabbricati per tipi di materiali utilizzati per la muratura piena di tamponamento. Ripartizione per grandi zone geografiche.

Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

al Sud dove più del 70% degli edifici presenta una totale assenza di isolamento.

Seppur pochi gli edifici isolati termicamente, tra i materiali isolanti termo-acustici maggiormente impiegati in Italia troviamo lana di vetro e la lana di roccia, pomice, vermiculite e perlite. Nelle regioni settentrionali le lane minerali, vermiculite e perlite sono maggiormente impiegate, mentre nel Centro e Sud Italia (soprattutto in Sicilia) la pomice è il materiale più diffuso seguito dalle lane di vetro e di roccia. Per quanto riguarda i serramenti, la maggior parte degli edifici italiani è dotata di telai in legno (86,3%), mentre solo una piccola parte possiede delle ferro-finestre o dei telai in lamiera d'acciaio. Sussistono però alcune differenze in base alle regioni: il Nord Italia risulta in linea con la tendenza nazionale, mentre il Sud risulta il luogo con la maggior diffusione di ferro-finestre.

Passando agli impianti di riscaldamento si evince una differenza notevole tra le aree Settentrionali e Centrali dell'Italia e quelle Meridionali. Nelle prime prevalgono nettamente gli edifici con impianto centralizzato e sono molto pochi quelli che non posseggono un impianto di riscaldamento. Mentre al Sud la situazione si ribalta: il 51% dei fabbricati non è dotato di impianti, addirittura in Sicilia la percentuale sale al 79%.

Considerando adesso i soli impianti di riscaldamento centralizzati e i combustibili utilizzati risulta che in Italia prevale l'uso del combustibile liquido (91,7%). Al Nord e al Centro, anche se in percentuale molto minore, vengono utilizzati anche combustibili solidi e gas. Mentre nelle regioni Meridionali prevale nettamente l'uso di combustibili liquidi e i combustibili solidi sono utilizzati per una percentuale quasi irrilevante.

Per quanto riguarda i terminali risulta che in Italia circa la metà degli alloggi riscaldati possiede dei radiatori in ghisa, seguono i radiatori in acciaio (21,6%) e altri sistemi in percentuali molto minori. Tendenzialmente, tutte le zone dell'Italia sono in linea con la media italiana tranne la Sicilia: i radiatori in ghisa sono poco diffusi (14,7%) e risultano più utilizzati radiatori in acciaio e piastre in acciaio.

Il profilo tipo di un edificio costruito intorno alla metà del secolo scorso in Italia è ben descritto dalle parole di Gaspari:

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Materiali utilizzati per la muratura di tamp. con camera d'aria:						
Mattoni pieni	7,4	13,2	4,3	2,3	53	10,7
Mattoni forati	74,3	50,9	65,9	60,9	35,3	60,9
Pomice	0,9	0	4,3	2,3	8,8	2,3
Manufatti di cemento	0	1,9	0	3,4	0	1,2
Matt. Pieni e forati	16,5	32,1	25,5	8,1	2,9	19,5
Matt. forati e mat. vetrosi	0,9	1,9	0	2,3	0	1,2
Matt. forati e manufatti di cem.	0	0	0	3,4	0	0,7
Matt. forati e pomice	0	0	0	16,2	0	3,3
Matt. pieni e manufatti di cem.	0	0	0	1,1	0	0,2

Fig. 8 Fabbricati per tipi di materiali utilizzati per la muratura di tamponamento con camera d'aria. Ripartizione per grandi zone geografiche.

Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

«Le scelte tecnologiche risultano elementari e prive di quegli accorgimenti necessari a garantire qualità ed efficienza al sistema edilizio: è diffusa la presenza di ponti termici sia in corrispondenza dei nodi strutturali, sia in presenza di elementi in aggetto o di logge; non è dedicata alcuna attenzione all'elaborazione di dettagli finalizzati a preservare gli elementi tecnici dall'azione degli agenti atmosferici né vi è, in genere, alcun provvedimento per il controllo indiretto dell'irraggiamento; i pacchetti di chiusura sono scarsamente isolati sia termicamente che acusticamente; [...] La consuetudine di lasciare a vista il telaio e le strutture in c.a. rendendo esplicita la natura e la funzione del tamponamento, ha spesso diminuito la durabilità attesa per la struttura primaria che, esposta agli agenti atmosferici e a periodici cicli termici, è frequentemente afflitta da varie forme di degrado, che pregiudicano l'integrità dei copriferrì esponendo le armature a ossidazione e deterioramento. [...] Queste condizioni di potenziale degrado sono state, nel corso del tempo, aggravate dalle modifiche di natura antropica attuate proprio nel cercare di contrastare l'insorgenza dei primi danni. Si tratta per lo più di iniziative individuali (sostituzioni puntuali, manutenzioni improprie, aggiunte incoerenti) apportate senza alcuna conoscenza tecnica specifica e tese a rendere più "sopportabili" le inefficienze. [...] Accade sovente di riscontrare l'impropria sostituzione degli infissi originari con altri di geometria e materiale diverso, l'applicazione di un secondo serramento, l'introduzione di elementi di protezione dall'irraggiamento o di sicurezza sui fori finestra, o di assistere alla chiusura di logge e terrazze per ottenere delle verande o vere e proprie superfetazioni. Si tratta di addizioni spontanee che l'utenza autogestisce senza preoccuparsi della variazione dell'assetto complessivo del corpo edilizio, né tanto meno della qualità costruttiva con cui esse sono realizzate»¹⁷.

Come conseguenza della bassa qualità dei fabbricati si hanno considerevoli dispersioni termiche da parte dell'involucro e dei serramenti che comportano elevate quantità di energia per garantire le adeguate condizioni di comfort interno.

¹⁷ Gaspari, Jacopo, *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Monfalcone (GO): Edicomeditazioni, 2012.

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Parti del fabbricato isolate termicamente:						
Murature tamp. esterno	5,4	3,2	2,4	1,3	10,2	3,9
Solai	24,4	19,6	21,5	14,9	12,7	19,3
Pareti	4,8	2,5	1,9	1,9	0	2,4
Murature tamp. esterno e solai	3	2,2	0,5	1,9	3,4	2,1
Murature tamp. esterno e pareti	1,2	0,6	0	0	0	0,4
Solai e pareti	6	7	1	1,3	0	3,7
Murature tamp. esterno, solai e pareti	3,6	2,2	0	0	0,8	1,5
In nessuna parte	51,6	62,7	72,7	78,7	72,9	66,7

Fig. 9 Fabbricati a seconda delle parti isolate termicamente. Ripartizione per grandi zone geografiche.

Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

Per valutare le dispersioni termiche attraverso l'involucro, generalmente si utilizza come parametro di riferimento il valore di trasmittanza termica.

La figura 15 mostra i valori di trasmittanza massimi e minimi in base all'epoca di costruzione dell'immobile. Si evince che una parete costruita intorno alla metà del secolo scorso presenta dei valori di trasmittanza termica compresi tra 1,1 e 1,4 W/m²K, che confrontati con i valori di una parete costruita oggi compresi tra 0,4 e 0,5 W/m²K, risultano essere il doppio o il triplo.

In conclusione, tramite questa serie di dati, si vuole sottolineare la scarsa qualità e le insufficienti prestazioni energetiche dei fabbricati costruiti negli anni centrali del '900 sulla base di parametri puramente quantitativi, arrivati fino ai nostri giorni e all'interno dei quali vive la maggior parte della popolazione italiana. Da qui nasce l'attuale necessità di riqualificare il patrimonio edilizio esistente allo scopo di gravare meno sull'ambiente, riducendo il consumo di energia del settore edilizio.

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Materiali per l'isolamento termo-acustico:						
Pomice	8	25,6	37,9	25,8	41,8	23,8
Sughero	8,8	12,1	4,3	3,2	0	8,7
Spugno-cemento	2,4	1,9	0	3,2	6,5	2,1
Vermiculite e perlite	31,2	21,4	21,7	9,7	9,7	22,5
Lana di vetro, di roccia	35,2	31,1	30,4	51,7	32,3	33,6
Eraclit e simili	6,4	4,2	2,9	0	6,5	4,5
Pannelli prefabbricati in gesso	0	0,9	0	3,2	0	0,6
Polistirolo espanso	4,8	1,4	1,4	3,2	0	2,3
Cartoni bitumati	0	0	1,4	0	3,2	0,4
Varie	3,2	1,4	0	0	0	1,5

Fig. 10 Materiali per l'isolamento termo-acustico. Ripartizione per grandi zone geografiche.

Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Materiali impiegati per gli infissi delle finestre:						
Legno	87	88	91,4	81	78,1	86,3
Lamiera di acciaio	1,8	1,6	0,5	2,5	7,6	2,3
Profilati ferro-finestra	1,2	3,2	3,3	10,8	7,6	4,6
Leghe leggere	2,9	0,6	1,9	0,6	4,2	1,7
Laminato plastico	0	0	0	0	1,7	0,2
Zinco	0	0,6	0	1,3	0	0,4
Legno e prof. ferro-finestra	1,8	3,5	1	1,9	0	2
Legno e lamiere di acciaio	2,4	0,9	0,5	0,6	0	0,9
Legno e leghe leggere	2,9	1,6	1,4	1,3	0	1,5
Lamiera di acciaio e prof. ferro-finestra	0	0	0	0	0,8	0,1

Fig. 11 Fabbricati per tipo di materiale impiegato per gli infissi delle finestre. Ripartizione per grandi zone geografiche.

Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Tipo di impianto di risc.:						
Impianto centralizzato	84,91	60,17	62,73	45,9	18,84	69,03
Impianto singolo	9,35	23,24	20,28	3,03	1,97	16,64
Impianto assente	5,74	16,59	16,99	51,03	79,19	31,16

Fig. 12 Fabbricati a seconda della disponibilità dell'impianto di riscaldamento. Ripartizione per grandi zone geografiche.

Fonte: Rielaborazione dati presenti in CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Combustibile bruciato nelle caldaie degli imp. centralizzati:						
Comb. liquido	89,9	92	89,9	95,7	96,9	91,7
Comb. solido	5,4	2,5	9,4	4,3	3,1	5,1
Gas metano	2,7	2,5	0	0	0	1,5
Gas di città	2	2,5	0,7	0	0	1,5
Comb. misti	0	0,5	0	0	0	0,2

Fig. 13 Fabbricati a seconda del combustibile bruciato nelle caldaie degli impianti centralizzati di riscaldamento. Ripartizione per grandi zone geografiche.

Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

	Zona geografica					
	Nord Ovest [%]	Nord Est [%]	Centro [%]	Sud [%]	Sicilia [%]	Italia [%]
Tipo di risc.:						
Radiatore di ghisa	49,4	53	56,1	61,8	14,7	52
Radiatore di acciaio	12	28	22,8	17,1	23,5	21,6
Piastre in acciaio	12,7	7,1	10,5	10,5	17,6	10,2
Piastre in ghisa	4,2	0,4	2,8	4	20,6	3,2
Pannelli a pareti	1,8	0,4	1,7	1,3	3	1,3
Pannelli a pavimento	5,4	1,2	2,2	1,3	0	2,4
Pannelli a soffitto	10,9	0,4	1,1	0	0	3
Bocche d'aria	0,6	1,6	1,7	0	8,8	1,5
Termo-convettori	2,4	7,9	1,1	4	0	4,1
Altro	0,6	0	0	0	11,8	0,7

Fig. 14 Tipo di riscaldamento. Ripartizione per grandi zone geografiche.
Fonte: CRESME, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

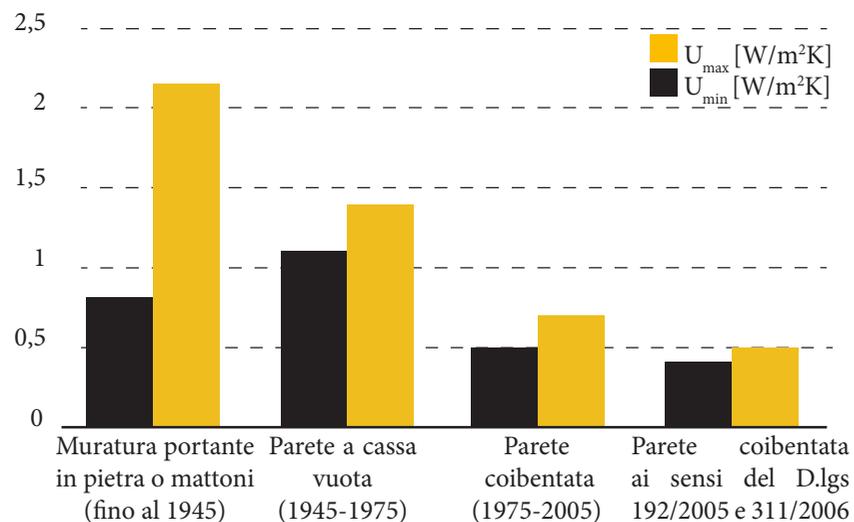


Fig. 15 Variazione della trasmittanza termica delle chiusure verticali al variare dell'epoca di costruzione.

Fonte: Fiorito, Francesco, *Involucro edilizio e risparmi energetico*, Palermo: Flaccovio, 2009.

Il dibattito sul risparmio energetico in edilizia

«Ambiente e cambiamenti climatici, approvvigionamento energetico e costi energetici sono le tre maggiori sfide per l'umanità e per il pianeta. Strettamente collegate tra loro, esse rappresentano al tempo stesso un pericolo ed un'occasione. [...] Di decisiva importanza sarà il modo in cui gli uomini sapranno interpretare e gestire questo cambiamento epocale.»

Lantschner, Norbert, *CasaClima: vivere nel più*, Bolzano: Raetia, 2007.

Preso atto della situazione climatica in cui verte il nostro pianeta e dell'impatto che il settore edilizio ha su di esso (in termini di consumo di suolo, di energia e di risorse), si resero necessari sin dagli ultimi decenni del '900, degli interventi mirati alla protezione dell'ambiente. *«Da molto tempo gli esperti e gli studiosi stanno mettendo in guardia l'uomo contro gli effetti irreversibili di quattro macro-fenomeni che agiscono sull'equilibrio tra l'uomo e l'ambiente che lo circonda, tra cui lo spreco di gran parte delle materie prime, l'inquinamento dell'ambiente, la produzione di una quantità notevole di rifiuti e ultimo, ma non meno importante, il veloce e rapido aumento della popolazione»*¹⁸.

Precisamente, l'ampio dibattito riguardante i problemi ambientali, i cambiamenti climatici e il futuro della terra si instaurò a seguito delle crisi petrolifere degli anni '70 e con la definizione del concetto di sviluppo sostenibile come *«quello sviluppo che consente alla generazione*

¹⁸ Ponzini, Carlo, *L'edificio energeticamente sostenibile: materiali contemporanei per il risparmio energetico*, Santarcangelo di Romagna (RN): Maggioli, 2012.

presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri»¹⁹.

Ma bisogna aspettare l'arrivo degli anni '80 per la concreta definizione dei primi accordi a livello mondiale. Si tratta di una serie di incontri nei quali si discute della situazione ambientale attuale e futura del pianeta, allo scopo di porre degli obiettivi a medio-lungo termine per contenere il cambiamento climatico e l'uso spropositato di risorse.

Nel 1985 otto Paesi appartenenti alla *Comunità Economica Europea* (CEE) sottoscrissero il *Protocollo di Helsinki* che prevedeva la diminuzione delle emissioni di anidride solforosa (SO₂) e biossido di azoto (NO₂) del 30% rispetto ai valori registrati nel 1980. Il *Protocollo di Helsinki* «è uno dei primi accordi volontari internazionali intesi a porre rimedio a questioni di inquinamento transnazionale e, a partire da questa data, gli impatti diventano sempre più importanti, e il modo di controllarli e limitarli un importante tema di dibattito»²⁰.

Successivamente venne stipulato, da parte di ventiquattro Paesi industrializzati, il *Protocollo di Montreal* nel 1988 che prevedeva la riduzione delle emissioni di alcune sostanze, come clorofluorocarburi (CFC) e la famiglia degli idrocarburi alogenati, che favoriscono l'assottigliamento dello strato di Ozono stratosferico.

La *Conferenza mondiale sull'ambiente e lo sviluppo* tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992 risulta di notevole importanza per l'elevato numero di partecipanti: 172 governi, 108 capi di Stato e 2400 rappresentanti di ONG. Si discusse ampiamente dei problemi ambientali e al termine della conferenza venne introdotta l'*Agenda 21*: «si tratta di un documento programmatico che sintetizza le azioni specifiche e le strategie che i Paesi firmatari si impegnano ad attuare per favorire lo sviluppo sostenibile»²¹.

In più, i membri dell'ONU firmarono la *Convenzione quadro delle Na-*

19 Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED), *Our common future*, 1987.

20 Della Posta, Pompeo e Anna Maria Rossi, *Effetti, potenzialità e limiti della globalizzazione*, Milano: Springer, 2007.

21 Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, ENEA, FINCO, *Libro bianco "Energia-ambiente-edificio"*, Milano: Il Sole 24 ore, 2004.

zioni Unite sui cambiamenti climatici con l'obiettivo di «stabilizzare le concentrazioni nell'atmosfera dei gas ad effetto serra ad un livello tale da impedire pericolose interferenze di origine umana con il sistema climatico»²². Dopo di che, i rappresentanti degli Stati firmatari si incontreranno periodicamente nella *Conferenza delle parti* (COP) per valutare i progressi raggiunti.

In Danimarca, precisamente ad Aalborg, nel 1994 si tenne la *Conferenza europea sulle città sostenibili* alla fine della quale venne stilata la *Carta delle città europee per uno sviluppo durevole e sostenibile* anche detta *Carta di Aalborg*. Firmata da 333 tra amministrazioni locali europee, rappresentanti di organizzazioni internazionali, Stati, istituti scientifici e singoli cittadini, il suddetto documento promuove l'elaborazione di piani d'azione volti a garantire uno sviluppo durevole e sostenibile nel lungo periodo oltre che la predisposizione dell'*Agenda 21 locale*.

Con la sottoscrizione del *Protocollo di Kyoto* nel 1997 si raggiunge un importante obiettivo: «i Paesi più industrializzati (ai quali sono dovute più del 70% delle emissioni di gas serra) si impegnano a ridurre complessivamente le emissioni dei gas clima alteranti del 5.2% tra il 2008 e il 2012, rispetto al livello misurato nel 1990»²³.

La quota complessiva delle emissioni non è uguale per tutti i Paesi: all'Europa spetta una riduzione dell'8%, agli Stati Uniti del 7% e al Giappone spetta il 6%. Per altri Paesi come la Russia, Nuova Zelanda e l'Ucraina, è prevista la stabilizzazione delle emissioni, mentre per Norvegia, Austria e Islanda è possibile un incremento. I Paesi in via di sviluppo invece non sono vincolati da tali limiti al fine di non compromettere la loro crescita. Nella figura 16 si nota la situazione delle emissioni all'anno 2000, confrontate con la situazione al 1990 e con gli impegni sottoscritti con il *Protocollo di Kyoto*.

Nella *Conferenza Internazionale sugli Insediamenti Urbani* denominata *Habitat II* e organizzata dall'ONU nel 1996, si è discusso del ruolo

22 UNFCCC, 1992.

23 Della Posta, Pompeo e Anna Maria Rossi, *Effetti, potenzialità e limiti della globalizzazione*, Milano: Springer, 2007.

delle città nell'ambito di uno sviluppo sostenibile. Più dei due terzi della popolazione mondiale vive in città, esponendosi continuamente agli agenti inquinanti e in cui il consumo di energia avviene spesso in modo poco efficiente. La città produce emissioni e rifiuti che non può gestire: va quindi rivisto il rapporto tra sviluppo e ambiente. È stata così sottoscritta l'*Agenda Habitat II* con lo scopo di migliorare la sostenibilità dei centri urbani attraverso il risparmio energetico negli edifici, il riutilizzo e il riciclo dei materiali, promuovendo la conservazione di spazi ed edifici.

Nel 2002, precisamente a dieci anni dalla *Conferenza di Rio*, si è svolto a Johannesburg il *Vertice mondiale sullo sviluppo sostenibile* con lo scopo di verificare lo stato di avanzamento dei provvedimenti sottoscritti dieci anni prima. Purtroppo, i risultati non sono dei migliori: gli impegni dell'*Agenda 21* non sono stati del tutto soddisfatti e gli effetti sul clima risultano maggiorati.

Nel 2008, si è svolto ad Hokkaido il 34° Summit del G8, che vede riuniti annualmente i rappresentanti degli otto Paesi più sviluppati per discutere di questioni economiche e sociali a livello globale. Quello di Hokkaido si è concentrato sulla lotta al cambiamento climatico e si è concluso con un accordo: ridurre del 50% le emissioni di CO₂ entro il 2050. Inoltre, traguardo importante di questo Summit è stata la volontà dell'allora presidente degli Stati Uniti di impegnarsi per la prima volta nella lotta contro i cambiamenti climatici.

Più recentemente, nel dicembre 2015, durante la *COP 21* i Paesi membri dell'ONU hanno sottoscritto a Parigi l'*Agenda 2030*: una specie di "piano d'azione" per contrastare i cambiamenti climatici. Pilastro dell'*Agenda 2030* sono i 17 punti per lo sviluppo sostenibile, ovvero gli obiettivi che i Paesi membri si impegnano a raggiungere entro il 2030.

Tramite la descrizione di questa serie di eventi si evince che il problema ambientale risulta noto già dalla seconda metà del secolo scorso. Al giorno d'oggi quello che resta da fare è agire operando un cambiamento di rotta rispetto a quella seguita finora caratterizzata dal consumo illimitato di energia. Bisogna tradurre le parole in regole, in normative. Purtroppo, come si vede in figura 18, ancora oggi quasi due terzi dei Paesi del pianeta non ha stabilito delle regole obbligatorie per il settore delle costruzioni.

	1990 [Mt CO ₂ eq]	2000 [Mt CO ₂ eq] ₂	2000-1990 [%]	Impegno Kyoto [%]
Austria	77,388	79,754	3,1	-13
Belgio	143,125	151,93	6,2	-7,5
Danimarca	69,36	68,505	-1,2	-21
Finlandia	77,093	73,958	-4,1	0
Francia	551,805	542,299	-1,7	0
Germania	1222,765	991,421	-18,9	-21
Grecia	104,755	129,652	23,8	25
Irlanda	53,43	66,277	24	13
Italia	522,132	543,464	4,1	-6,5
Lussemburgo	10,836	5,949	-45,1	-28
Olanda	210,342	216,916	3,1	-6
Portogallo	65,106	84,7	30,1	27
Spagna	286,428	385,987	34,8	15
Svezia	70,566	69,356	-1,7	4
UK	742,492	649,106	-12,6	-12,5
EU-15	4207,624	4059,276	-3,5	-8

Fig. 16 Emissioni gas serra 1990-1999 per paese e impegni di Kyoto.

Fonte: European Environment Agency (2002) in Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, ENEA, FINCO, *Libro bianco "Energia-ambiente-edificio"*, Milano: Il Sole 24 ore, 2004.



Fig. 17 I 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile

Fonte: getupandgoals.it

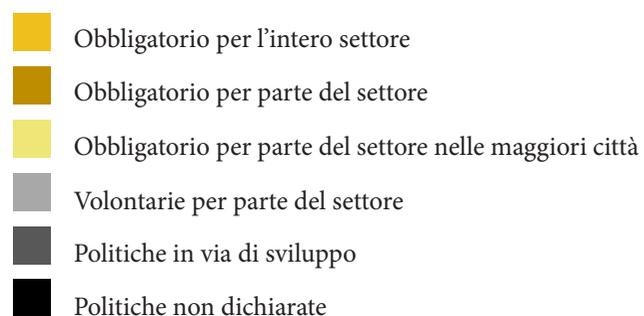
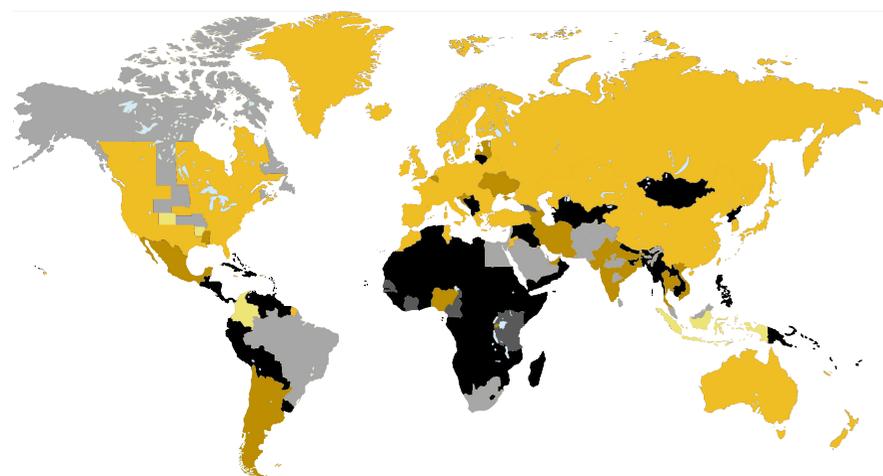


Fig. 18 Politiche di efficienza energetica nel settore delle costruzioni (2017-2018).
Fonte: iea.org

I provvedimenti: il quadro normativo europeo

«Il settore dell'edilizia e delle abitazioni non si può certo sottrarre ad una riflessione sul proprio impatto e ad attivare azioni per ridurre la propria incidenza in materia energetica e ambientale, nonché sull'impatto antropico dovuto alle attività legate all'edilizia, in termini di modifica e alterazione del territorio, dei fabbisogni energetici anche legati ad altri settori quali quello dei trasporti (estensione insediamenti e reti cittadine), delle reti infrastrutturali ed energetiche e delle attività produttive e industriali.»

Fabbri, Kristian, *Risparmio energetico in edilizia*, Roma: Dei, 2012.

La prima normativa emanata a livello Europeo è la Direttiva 2002/91/CE, anche nota come *EPBD (Energy Performance of Building Directive)*, che doveva essere recepita dagli stati membri entro il 2006.

Come scrive Fabbri: *«obiettivo della direttiva è promuovere il miglioramento del rendimento energetico degli edifici nella Comunità, rendimento che deve essere espresso in modo trasparente ed indicare il valore delle emissioni di CO₂»²⁴.*

La normativa prevede:

«l'adozione di una metodologia di calcolo condivisa (art. 3), su base nazionale o regionale, compresa la fissazione dei requisiti di rendimento energetico specificati nell'Allegato e prevede l'introduzione di un Attestato di Certificazione Energetica (art. 7) nel quale siano riportate le ca-

²⁴ Fabbri, Kristian, *Risparmio energetico in edilizia*, Roma: Dei, 2012.

ratteristiche e le prestazioni energetiche degli edifici e gli interventi per migliorare il rendimento energetico. [...] La direttiva prevede l'adozione di misure necessarie per l'ispezione delle caldaie (art. 8) e dei sistemi di condizionamento d'aria (art. 9)»²⁵.

La direttiva è rivolta sia agli interventi di nuova costruzione che di riqualificazione dell'esistente, per i quali prescrive dei limiti prestazionali da rispettare. Non sono invece considerati alcuni edifici quali luoghi di culto, monumenti, fabbricati industriali riscaldati dai processi svolti all'interno e edifici isolati con superficie inferiore a 50 m². Inoltre, nell'art. 10, stabilisce che gli stati debbano delegare l'attività di certificazione esclusivamente a figure qualificate e/o riconosciute. La Direttiva 2006/32/CE «ha lo scopo di migliorare l'efficienza degli usi finali di energia ed, in parte, interessa il rendimento energetico degli edifici, inoltre chiarisce alcuni aspetti della direttiva 2002/91/CE»²⁶ e abroga la precedente direttiva 93/76/CEE.

Nel 2010 viene pubblicata la direttiva 2010/31/UE, anche conosciuta come *EPBD Recast*. Quest'ultima si prefigge di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici «tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi»²⁷.

Fornisce inoltre la metodologia per il calcolo della prestazione energetica dei fabbricati, regola i sistemi di cogenerazione, il teleriscaldamento, le pompe di calore ed i sistemi che impiegano fonti rinnovabili e fissa nuovi limiti di trasmittanza termica: a partire dal 1° Gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° Gennaio 2021 per edifici residenziali, tutte le nuove costruzioni dovranno essere *nearly zero energy building* (nZEB) cioè devono avere ridotto consumo di energia e produrre da sé energia che sarà utilizzata per coprire parte del fabbisogno energetico dell'edificio.

L'ultima Direttiva comunitaria pubblicata, la 2018/844/UE, integra e modifica la precedente 2010/31/CE. Scaturisce dalle indicazioni di-

²⁵ *Ibidem*

²⁶ *Ibidem*

²⁷ Ondulit italiana, *Il contenimento energetico in edilizia: manuale di rapida consultazione*, Roma: DEI, 2011.

vulgate dalla Commissione Europea nel 2016 conosciute come *Clean energy for all Europeans*. Queste ultime si pongono l'obiettivo di fornire energia stabile, da fonti rinnovabili e ad un costo accessibile a tutti gli Europei.

La nuova direttiva pone l'accento sugli interventi di riqualificazione valorizzandone i benefici, si propone di migliorare l'informazione dei consumatori al fine di renderli maggiormente consapevoli e, infine, promuove la mobilità sostenibile e l'impiego dell'informatica in edilizia.

I provvedimenti: il quadro normativo italiano

«L'incidenza e l'impatto del settore edile è pari a circa il 40% dei consumi energetici nazionali e tra questi consumi la maggior parte è dovuta al riscaldamento degli ambienti e alla produzione di acqua calda sanitaria. Almeno fino ad oggi. Con il modificarsi delle abitudini e con l'innalzamento delle temperature medie invernali ed estive, si stanno modificando anche i requisiti di comfort che devono essere garantiti dall'edificio.»

Fabbri, Kristian, *Risparmio energetico in edilizia*, Roma: Dei, 2012.

A livello nazionale, la prima normativa che prese in considerazione l'energia in ambito edilizio risale al 1976 ed è la legge 373/1976 dal nome *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici*, pubblicata a seguito della prima crisi energetica. L'obiettivo di tale legge è la limitazione delle dispersioni termiche ed inoltre rappresenta la prima tappa di un lungo percorso verso il risparmio energetico nel settore delle costruzioni.

Tramite i decreti attuativi D.P.R. 28 giugno 1977 e D.M. 10 marzo 1977 «fissa alcuni limiti tra i quali: i limiti di potenza degli impianti di riscaldamento, la temperatura massima interna degli edifici prescrivendo, di fatto, l'isolamento termico dell'involucro edilizio»²⁸.

Nel 1991 viene pubblicata la legge 10/91 denominata *Norme per l'attuazione del Piano energetico Nazionale in materia di uso razionale*

dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia, una delle prime norme in materia di energia in Europa. Questa legge resterà in vigore fino alla pubblicazione del D.lgs 192/2005, tranne che per un breve periodo del 2005 quando venne affiancata dal D.M. 178/2005.

Come spiega Fabbri: «i contenuti della legge 10/1991 erano all'avanguardia, poiché essa prevedeva la certificazione energetica degli edifici, anche se a carico dei Comuni; [...] ha istituito (art. 5) i piani energetici regionali, (art. 6) la realizzazione delle reti di teleriscaldamento, (art. 8) i contributi a sostegno delle fonti rinnovabili nell'edilizia»²⁹, infatti per quattordici anni sarà la legge in vigore riguardo alla progettazione dell'involucro e dell'impianto di riscaldamento.

Alla pubblicazione della legge segue il decreto attuativo D.P.R. 412/93 che introduce le zone climatiche, cioè suddivide il territorio italiano in sei zone in funzione dei gradi giorno e fornisce per ogni zona climatica il periodo e le ore massime giornaliere in cui è possibile riscaldare gli edifici. Quest'ultimo attua parte dell'art.4 della legge 10/91 e viene modificato dal D.P.R. 551/99.

Nel 2005, l'Italia recepisce la direttiva Europea 2002/91/CE (che doveva essere accolta dagli Stati membri entro il 2006) con il D.lgs 192/2005 chiamato *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia*, successivamente modificato con il D.lgs 311/2006. Inoltre, il suddetto decreto applica la legge 10/91.

Le finalità del decreto sono: promuovere il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici stabilendone principi e modalità, promuovere l'uso delle energie rinnovabili e sostenere gli obiettivi del *Protocollo di Kyoto* attraverso delle azioni concrete sugli edifici.

Fondamentale è l'allegato C perché introduce i limiti di trasmittanza termica «differenziati per tipologia di chiusura, per zona climatica e per termine temporali di applicazione normativa»³⁰.

Questi limiti fanno riferimento alle strutture opache e trasparenti componenti l'involucro e diventano cogenti a partire dal 1° gennaio

²⁸ Fabbri, Kristian, *Risparmio energetico in edilizia*, Roma: Dei, 2012.

²⁹ *Ibidem*

³⁰ Fiorito, Francesco, *Involucro edilizio e risparmio energetico*, Palermo: Flaccovio, 2009.

2006. Lo stesso decreto prescrive valori di trasmittanza termica più performanti a partire dal 1° gennaio 2008 e, successivamente con le modifiche apportate dal D.lgs 311/2006 i valori di trasmittanza da rispettare verranno ridotti ulteriormente a partire dal 1° gennaio 2010. In conclusione, scrive Fabbri riguardo al D.lgs 192/2005:

«Con il D.Lgs 192/2005 si è passati da una normativa prescrittiva a una normativa prestazionale, dal contenimento dei consumi energetici alla definizione delle prestazioni energetiche dell'edificio, comprendendo il sistema edificio impianto per il regime invernale (impianti di riscaldamento) già previsto dalla legge 10/1991, ma ampliando il concetto di prestazione energetica a tutti i consumi energetici negli edifici durante il regime invernale e il regime estivo, inclusi i consumi energetici per la produzione di acqua calda sanitaria e quelli dovuti alla illuminazione e agli usi elettrici»³¹.

Successivamente, nel 2009, si è provveduto ad emanare i decreti attuativi del D.lgs 192/2005 e cioè: il D.P.R. 59/2009 e il D.M. 26 giugno 2009.

Il primo «fissa i requisiti minimi nazionali, e la metodologia di calcolo della prestazione energetica degli edifici e impianti, nonché i criteri generali per l'edilizia pubblica, [...] ha validità su tutto il territorio nazionale per quelle regioni e province autonome che ancora non hanno approvato propri provvedimenti in applicazione alla direttiva 2002/91/CE»³². È bene ricordare che i requisiti minimi relativi alla climatizzazione invernale rimangono invariati rispetto al D.lgs 192/2005, mentre vengono introdotti quelli relativi alla climatizzazione estiva.

Il D.M. 26 giugno 2009 introduce le *Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici* rivolte a regioni e province autonome che non hanno ancora recepito le indicazioni della direttiva Europea 2002/91/CE. Nel frattempo, le regioni e province autonome che hanno già provveduto ad adottare una propria metodologia per la certificazione energetica degli edifici sono tenute a rivedere i propri metodi al fine di renderli quanto più conformi alle *Linee guida nazionali*.

31 Fabbri, Kristian, *Risparmio energetico in edilizia*, Roma: Dei, 2012.

32 *Ibidem*

Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache verticali

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2010 U (W/m ² K)
A	0,85	0,72	0,62
B	0,64	0,54	0,48
C	0,57	0,46	0,40
D	0,50	0,40	0,36
E	0,46	0,37	0,34
F	0,44	0,35	0,33

Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2010 U (W/m ² K)
A	0,80	0,42	0,38
B	0,60	0,42	0,38
C	0,55	0,42	0,38
D	0,46	0,35	0,32
E	0,43	0,32	0,30
F	0,41	0,31	0,29

Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali di pavimento

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2010 U (W/m ² K)
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

Fig. 19, 20, 21 Valori limite di trasmittanza termica differenziati per tipologia di chiusura, per zona climatica e per termini temporali di applicazione normativa. Fonte: Allegato C del D.lgs 311/2006

Valori limite di trasmittanza termica delle chiusure trasparenti comprensive degli infissi

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2010 U (W/m ² K)
A	0,80	0,74	0,65
B	0,60	0,55	0,49
C	0,55	0,49	0,42
D	0,46	0,41	0,36
E	0,43	0,38	0,33
F	0,41	0,36	0,32

Valori limite di trasmittanza termica dei vetri

Zona climatica	Dal 1° gennaio 2006 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2008 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2011 U (W/m ² K)
A	5,00	4,50	3,70
B	4,00	3,40	2,70
C	3,00	2,30	2,10
D	2,60	2,10	1,90
E	2,40	1,90	1,70
F	2,30	1,70	1,30

Fig. 22, 23 Valori limite di trasmittanza termica differenziati per tipologia di chiusura, per zona climatica e per termini temporali di applicazione normativa.

Fonte: Allegato C del D.lgs 311/2006

La direttiva comunitaria 2006/32/CE viene recepita dall'Italia tramite il D.lgs 115/2008 e «*si occupa dei servizi energetici e dell'energia intesa come "qualsiasi forma di energia commercialmente disponibili, inclusi elettricità, gas naturale, compreso il gas naturale liquefatto" (art. 2 comma 1 lett. A)*»³³.

Il D.L. 63/2013, successivamente convertito in legge 90/2013, recepisce la direttiva comunitaria 2010/31/UE e modifica il D.lgs 192/2005 che recepisce la direttiva 2002/91/CE. È un passo importante perché introduce nel linguaggio italiano il termine *edifici a energia quasi zero* (nZEB) e prescrive che a partire dal 1° gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° gennaio 2021 per tutti gli altri edifici di nuova edificazione debbano essere a energia quasi zero.

Inoltre, con la pubblicazione del suddetto decreto si rende obbligatorio l'*attestato di prestazione energetica* (A.P.E.) nei contratti di compravendita e locazione.

Tra le pubblicazioni più recenti spicca il D.M. 26 giugno 2015, decreto attuativo della legge 90/2013 dal nome *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*. Il suddetto decreto è a sua volta composto da tre decreti attuativi: il primo riguarda l'introduzione di nuovi requisiti minimi, il secondo introduce delle nuove *Linee guida nazionali per la certificazione energetica* e infine il terzo riguarda la relazione tecnica.

L'appendice B riporta i nuovi valori limite di trasmittanza per interventi di riqualificazione energetica da rispettare a partire dal 1° ottobre 2015 e di seguito, nuovi valori più restrittivi da rispettare dal 1° gennaio 2021.

La più recente direttiva Europea in vigore dal 9 luglio 2018, la 2018/844/UE, deve essere recepita dagli stati membri entro il 20 marzo 2020.

Inoltre, a partire dall'entrata in vigore della Legge Finanziaria del 2007, sono stati introdotti degli incentivi fiscali per quanto riguarda gli interventi volti a migliorare l'efficienza energetica degli edifici

³³ *Ibidem*

esistenti. Questi nuovi incentivi affiancano le già esistenti detrazioni fiscali per gli interventi di recupero del patrimonio edilizio, introdotte dalla legge 449/1997.

Fondamentale è il fatto che questo meccanismo di incentivazione «ha introdotto la riqualificazione energetica e l'efficienza energetica anche in edilizia, senza associarla obbligatoriamente alle sole soluzioni impiantistiche o ad alcune fonti rinnovabili»³⁴. Le detrazioni fiscali hanno riscosso fin da subito un grande successo, tanto che dopo circa un anno dalla loro introduzione si raggiunsero le «60.585 richieste ricevute con un risparmio di energia pari a 536.153,28 MWh, ed un totale di 114.297,30 t di CO₂ non emesse, ovvero circa 46,11 ktep risparmiati pari a circa la metà dei consumi di energia primaria di una piccola regione come il Molise o 1/3 dei consumi della Valle d'Aosta»³⁵.

Oggi, il *Rapporto annuale sull'efficienza energetica 2019*³⁶, parla di investimenti per circa 3,8 miliardi di euro dal 2007, che si traducono in un risparmio di 16.400 GWh/anno.

34 Fabbri, Kristian, *Guida alla riqualificazione energetica*, Roma: Dei, 2007.

35 *Ibidem*

36 pubblicato dall'ENEA sul sito www.energiaenergetica.enea.it

Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache verticali soggette a riqualificazioni

Zona climatica	Dal 1° ottobre 2015 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2021 U (W/m ² K)
A-B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura soggette a riqualificazioni

Zona climatica	Dal 1° ottobre 2015 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2021 U (W/m ² K)
A-B	0,34	0,32
C	3,40	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Valori limite di trasmittanza termica delle strutture opache orizzontali di pavimento soggette a riqualificazioni

Zona climatica	Dal 1° ottobre 2015 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2021 U (W/m ² K)
A-B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

Fig. 24, 25, 26 Valori limite di trasmittanza termica differenziati per tipologia di chiusura, per zona climatica e per termini temporali di applicazione normativa. Fonte: Appendice B del D.M. 26 Giugno 2015

Valori limite di trasmittanza termica delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti comprensive degli infissi soggette a riqualificazioni

Zona climatica	Dal 1° ottobre 2015 U (W/m ² K)	Dal 1° gennaio 2021 U (W/m ² K)
A-B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Valori limite del fattore di trasmissione solare totale g_{gl+sh} per componenti finestrati con orientamento da Est a Ovest passando per Sud, in presenza di una schermatura mobile

Zona climatica	Dal 1° ottobre 2015 g_{gl+sh} (-)	Dal 1° gennaio 2021 g_{gl+sh} (-)
Tutte	0,35	0,35

Fig. 27, 28 Valori limite di trasmittanza termica differenziati per tipologia di chiusura, per zona climatica e per termini temporali di applicazione normativa.
Fonte: Appendice B del D.M. 26 Giugno 2015

Perché riqualificare?

«Oggi, in un periodo di profonda crisi economica, è senza dubbio preferibile prevedere operazioni di ammodernamento del patrimonio edilizio esistente, siano esse di piccola e media scala, piuttosto che ipotizzare grandi piani edilizi di nuova concezione.»

Mitterer, Wittfrida e Gabriele Manella (a cura di), *Costruire sostenibilità: crisi ambientale e bioarchitettura*, Milano: FrancoAngeli, 2013.

Anni dopo l'emanazione delle prime leggi volte a migliorare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio italiano, quasi nulla è cambiato: l'edilizia, e soprattutto il settore residenziale, risulta responsabile di buona parte dell'energia consumata e delle emissioni di CO₂ (fig. 29, 30, 31). Piuttosto che continuare ad edificare senza sosta ricoprendo ogni angolo possibile del nostro territorio, risulterebbe più utile indirizzare alcuni elementi di riflessione circa le possibilità di recupero del tessuto esistente. Attualmente, sempre più persone investono in interventi di riqualificazione e le parole della Ferrante descrivono in poche righe lo sviluppo di tale fenomeno negli anni: *«il progressivo interesse che oggi alimenta gli studi sulla riqualificazione architettonica e prestazionale del patrimonio esistente nasce e si consolida come conseguenza ed epilogo del lungo processo espansivo del mercato edilizio che a partire dal secondo dopoguerra ha catalizzato gli investimenti economici e le risorse professionali, generando, di fatto, una saturazione delle aree urbanizzate ed una consistente flessione della domanda di nuovi*

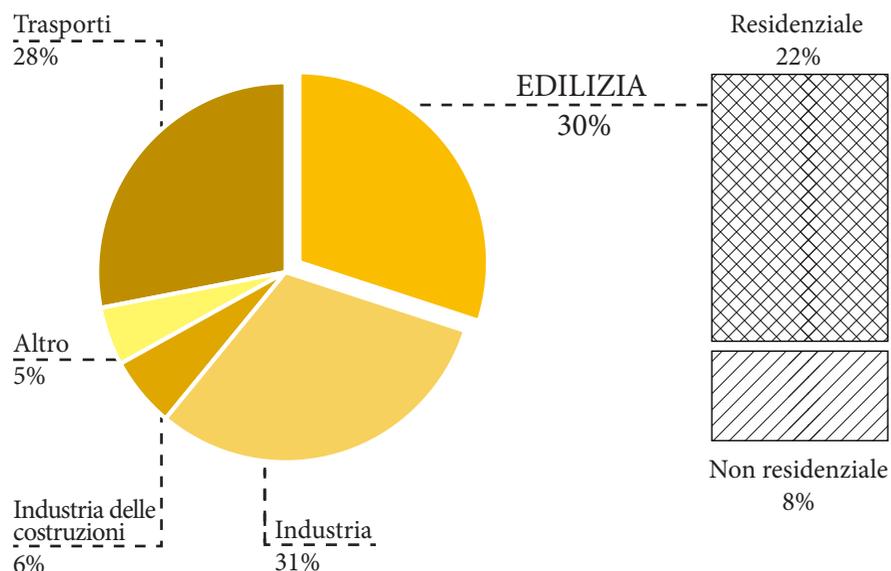


Fig. 29 Consumo finale di energia a livello mondiale per settori (2015).
Fonte: Global Energy & CO₂ Status Report 2017, IEA.

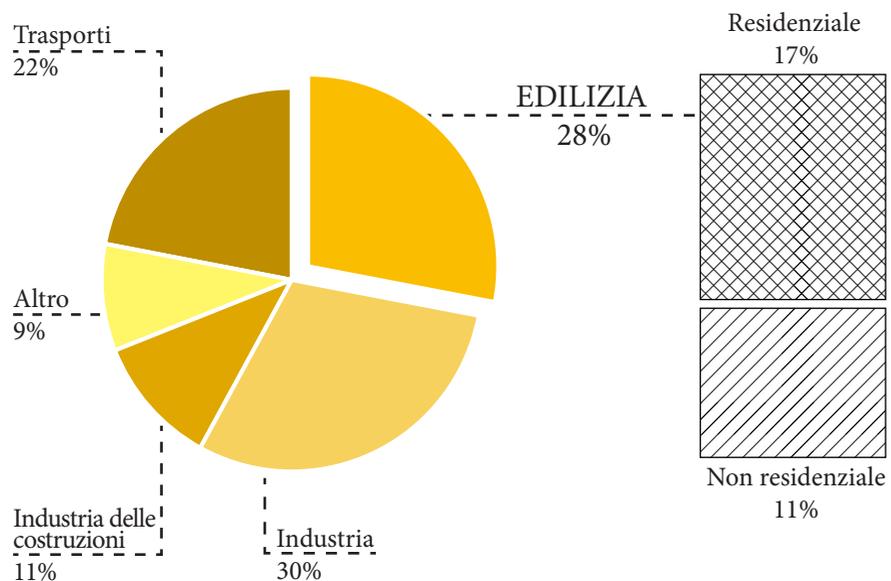


Fig. 30 Emissioni di CO₂ a a livello mondiale per settori (2015).
Fonte: Global Energy & CO₂ Status Report 2017, IEA.

insediamenti»³⁷.

Di seguito sono riportate alcune considerazioni volte ad evidenziare le potenzialità della riqualificazione edilizia.

La ragione principale per cui sono necessari interventi di recupero è legata all'età e alla qualità del patrimonio edilizio presente sul territorio nazionale. Infatti: «Secondo uno studio del CRESME il segmento corrispondente all'attività di manutenzione e riqualificazione del costruito è superiore al 60% del valore della produzione nelle costruzioni, del quale circa la metà interessa il settore residenziale»³⁸.

A questo punto, è utile sottolineare il cambiamento di rotta che ha investito il settore edilizio a partire dalla seconda metà degli anni '90: «negli anni '60 e '70 la nuova produzione abitativa rappresentava il 70-80% dell'intero mercato, mentre negli anni 2000 essa risulta ridotta al solo 20-17%»³⁹.

Ci si ritrova agli inizi degli anni 2000 nella situazione in cui il gran numero di edifici costruiti a partire dalla seconda guerra mondiale hanno compiuto quarant'anni «cioè la soglia oltre la quale si rendono necessari interventi di adeguamento, manutenzione straordinaria e recupero per garantire livelli qualitativi adeguati alle modifiche intervenute sullo stile di vita»⁴⁰.

Come si nota nel grafico (fig.32), la perdita di prestazione degli edifici nel tempo «può essere rappresentata come la distanza tra una linea costante, cioè il livello tecnico che soddisfa l'insieme di requisiti definiti in base alle necessità dell'utenza (retta A), e una linea inclinata che rappresenta una progressiva obsolescenza e/o degrado del manufatto (retta B). Il decremento di prestazione può essere arginato attraverso un insieme di azioni manutentive (indicate dalla retta spezzata) ordinarie e straordinarie che hanno luogo in base alla durabilità attesa per i diversi

³⁷ Ferrante, Annarita, A. A. A. *adeguamento, adattabilità, architettura: teorie e metodi per la riqualificazione architettonica, energetica ed ambientale del patrimonio edilizio esistente*, Milano: Bruno Mondadori, 2012.

³⁸ Gaspari, Jacopo, *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Monfalcone (GO): Edicomedizioni, 2012.

³⁹ *Ibidem*

⁴⁰ *Ibidem*

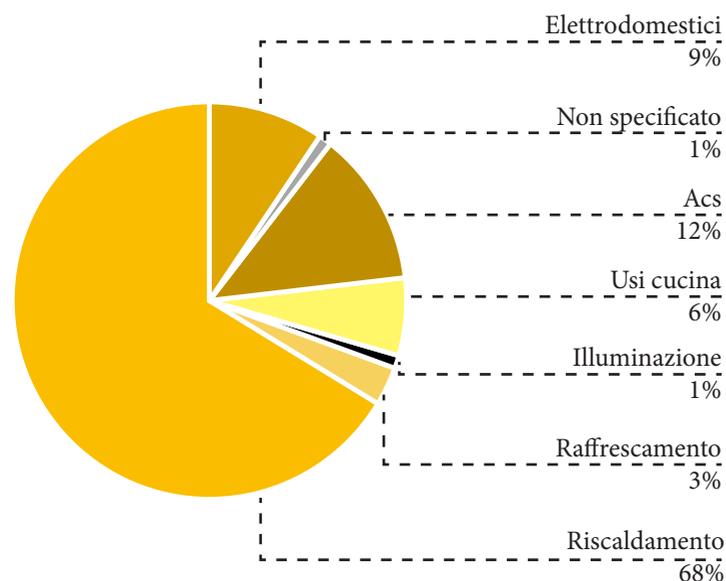


Fig. 31 Consumo finale di energia nel settore residenziale per uso finale.
Fonte: Energy efficiency indicators highlights 2017, IEA.

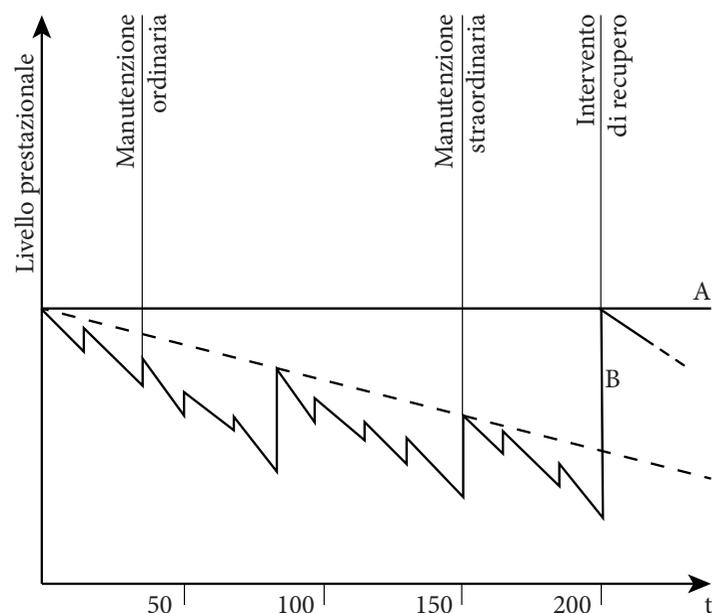


Fig. 32 La perdita di prestazione dell'organismo edilizio nel tempo.
Fonte: Gaspari, Jacopo, *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Monfalcone (GO): Edicomeditazioni, 2012.

componenti edilizi coinvolti o in base alle condizioni di degrado presenti»⁴¹. Un'altra ragione è legata alla normativa italiana, che negli anni precedenti ha influenzato e ancora oggi continua ad influenzare il settore delle costruzioni.

Come spiega Gaspari: «Con l'emanazione del D.lgs. n. 192/2005, successivamente integrato dal D. lgs. n. 311/2006 e poi dal D.P.R. n. 59/2009, il Governo italiano ha recepito le indicazioni della Direttiva Europea 2002/91/CE fissando dei valori limite rispetto ai quali viene valutato il comportamento termico e di conseguenza energetico di un edificio. Queste disposizioni sono state accompagnate da forme di incentivazione, quali le detrazioni fiscali più volte previste dalla legge Finanziaria e il Conto Energia, proprio con l'obiettivo di stimolare l'investimento di capitali sulla riqualificazione degli immobili di proprietà. Tuttavia, l'insieme di questi provvedimenti, pur costituendo un volano economico, non risulta in grado di esercitare alcuna forma di controllo sugli esiti complessivi degli interventi: in altre parole ne fissa le prestazioni, fornisce gli strumenti per il sostegno economico, ma non entra nel merito della qualità architettonica, funzionale, relazionale dell'azione di recupero lasciando ai progettisti o agli enti di controllo a livello locale il compito di tradurre efficacemente gli obiettivi. La mancanza di vere e proprie linee guida che consentano di dare coerenza agli interventi e di conseguire i livelli qualitativi omogenei rappresenta uno dei punti nevralgici dell'attuazione di efficaci politiche di riqualificazione che, sebbene ricche di opportunità, si traducono spesso in mere opere di adeguamento tecnologico-funzionale senza ottenere quel valore aggiunto perseguito invece da un approccio sostenibile all'intervento sull'esistente»⁴².

Inoltre, un intervento di riqualificazione, rispetto ad uno di nuova costruzione, porta con sé un ridotto impatto ambientale dovuto alla riduzione della quantità di materiali utilizzata, di detriti e di prodotti di scarto.

Altra motivazione che spinge a preferire un intervento di recupero rispetto ad una nuova costruzione riguarda un discorso molto ampio e

⁴¹ *Ibidem*

⁴² *Ibidem*

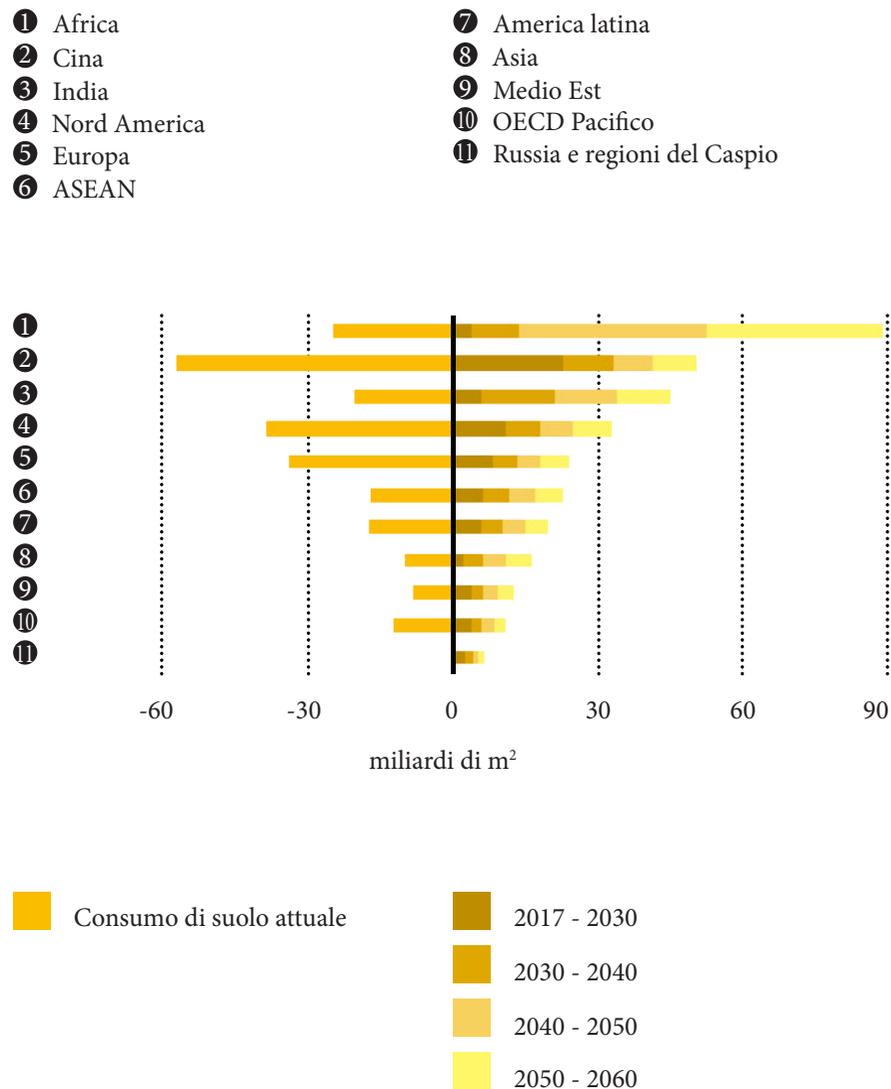


Fig. 33 Consumo di suolo previsto al 2060 per maggiori paesi.
 Note: *OECD Pacifico* include Australia, Nuova Zelanda, Giappone e Corea; *ASEAN*: Associazione delle Nazioni del Sud-Est Asiatico.
 Fonte: Gaspari, Jacopo, *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Monfalcone (GO): Edicomedizioni, 2012.

cioè il consumo di suolo.

Facendo un breve excursus storico si può dire che, a partire dalla fine del XIX secolo, l'espansione della città assume un nuovo significato. Prende piede il fenomeno della dispersione urbana che si traduce in: «città che si allargano a macchia d'olio e in modo disordinato sul territorio circostante»⁴³, dando vita a «enormi sobborghi diffusi sul territorio»⁴⁴.

Nasce così la città diffusa, cioè: «un'anomala città senza che di questa abbia le caratteristiche fisiche morfologiche tradizionali, mentre ne conserva quelle funzionali e sociali. Una città caratterizzata da ampia dotazione di tutto ciò che è "privato", ma sottodotata di tutto quello che è solitamente pubblico. La città diffusa "funziona" come una città compatta senza averne le caratteristiche di concentrazione e densità, si tratta, cioè, di una nuova forma di città, che della vecchia forma conserva alcuni difetti e pregi e che a questi si aggiungono difetti e pregi propri. Il momento di passaggio si ha, quindi, quando il territorio ampio si arricchisce di servizi e quando la popolazione insediata usa il territorio ampio, cioè i servizi ivi collocati, nello stesso modo nel quale si usano nella città compatta»⁴⁵.

Inoltre, spiega Giofrè: «Il fenomeno della dispersione urbana in Italia si caratterizza per la bassa densità e l'estrema diluizione del costruito in campagne e spazi aperti, un'espansione "orizzontale" che determina una condizione inedita di nuovi paesaggi ibridi (Zardini, 1996), né urbani né rurali, con la persistenza di vaste aree agricole e naturali all'interno dei perimetri metropolitani»⁴⁶.

Il tema dell'espansione orizzontale è stato trattato anche da Calvino quando, nel libro *Le città invisibili*, scrive delle città continue. Quello

43 <https://s.deascuola.it/il-secolo-delle-citta/citta-verticali.html>

44 *Ibidem*

45 Indovina, Francesco, *La città diffusa all'arcipelago metropolitano*, Milano: FrancoAngeli, 2009.

46 Giofrè, Vincenzo, *Riciclare l'urbano. Strategie rigenerative per la "città Orizzontale"*, TECHNE, Firenze University Press, 2019.

<https://search.proquest.com/openview/5639e4b35858e69585a-29367a8394fb2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=756407>

che accomuna città come Leonia, Trude, Procopia e Cecilia risiede nel fatto che esse si configurano come: «città anonime, dei non-luoghi senza carattere e distinzioni, città che si mescolano fra loro, sino a eliminare tutti gli spazi verdi e coprire l'intera superficie terrestre. S'espandono a dismisura, [...] ; non si distinguono da altre città, e parole come "centro" e "periferia" non hanno più senso, come a Penteselea, che è "una zuppa di città diluita nella pianura"»⁴⁷.

La situazione in cui verte attualmente l'Europa e di conseguenza l'Italia è la seguente: «In Europa negli ultimi venti anni si è assistito ad un incremento delle aree edificate, che è stato tre volte superiore alla crescita della popolazione. Anche l'Italia ha visto una esigua crescita demografica, a fronte di un processo di urbanizzazione che ha interessato grandi quantità di suoli agricoli e lo spopolamento di alcuni centri storici. [...] La preoccupazione è condivisibile, basti pensare che in Italia sono presenti 12,8 milioni di terra coltivabili e che il 24,61 % del suolo consumato nel biennio 2016/17 interessa aree con vincolo paesaggistico. Diversi comuni italiani superano il 50%, e talvolta il 60%, di territorio consumato»⁴⁸.

Quindi, l'unico scenario perseguibile risulta essere quello di: «costruire sul costruito», partendo dall'idea che non servano tanto nuove abitazioni ed edifici ma rendere disponibili ed ecocompatibili quelli esistenti»⁴⁹.

Altrimenti, la città contemporanea corre il rischio di trasformarsi in una delle città immaginate da Calvino: Penteselea. Il motivo emerge prepotentemente dalle parole dell'autore: «se nascosta in qualche sacca o ruga di questo slabbrato circondario esista una Penteselea riconoscibile e ricordabile da chi c'è stato, oppure se Penteselea è solo periferia di

47 <https://journals.openedition.org/italies/4471#tocto1n1>

48 Moraci, Francesca, e Celestina Fazio, *Ambiguità degli effetti delle discipline regionali sul consumo di suolo zero e sulla verticalità in architettura*, TECHNÉ, Firenze University Press, 2019.

<https://search.proquest.com/openview/9d0852571fe7b5403295744b-70b087f5/1?pq-origsite=gscholar&cbl=756407>

49 Mitterer, Wittfrida e Gabriele Manella (a cura di), *Costruire sostenibilità: crisi ambientale e bioarchitettura*, Milano: FrancoAngeli, 2013.

se stessa e ha il suo centro in ogni luogo, hai rinunciato capirlo. La domanda che adesso comincia a rodere nella tua testa è più angosciata: fuori da Penteselea esiste un fuori? O per quanto ti allontani dalla città non fai che passare da un limbo all'altro e non arrivi a uscirne?»⁵⁰.

50 Calvino, Italo, *Le città invisibili*, Milano: Mondadori, 2014.

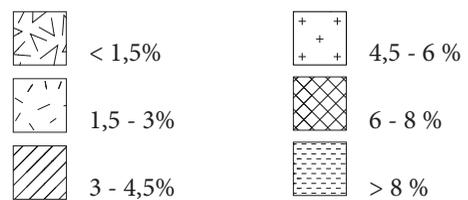


Fig. 34 Percentuale del consumo di suolo in Italia nel 1956.
Fonte: ISPRA

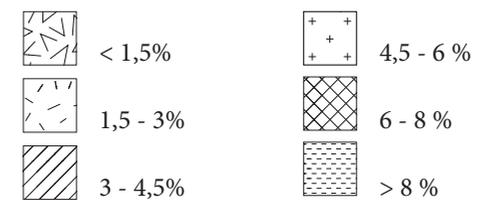
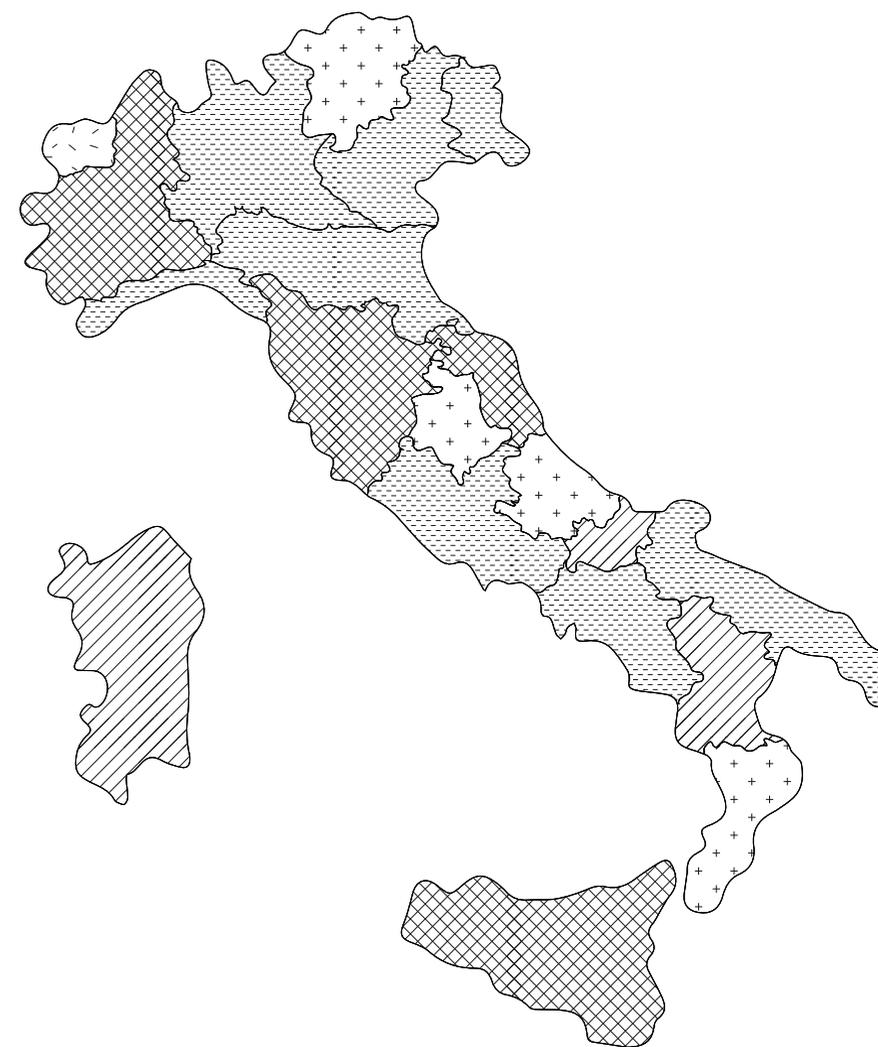


Fig. 35 Percentuale del consumo di suolo in Italia nel 2018.
Fonte: ISPRA

Intervenire sull'involucro

«L'involucro esterno, può essere definito come il luogo della mediazione ambientale, nel quale dovrebbero trovare soluzione i rapporti tra le esigenze dell'abitare e le condizioni esterne cioè quelle del sito geografico[...]; l'involucro cioè da una parte deputato a proteggere l'uomo dall'ambiente e dall'altra deve quale sistema aperto, integrarsi con esso.»

Rodonò, Umberto, *L'involucro esterno*, Catania: Dipartimento di architettura e urbanistica - Univ. degli studi di Catania, 1990.

Se nel passato l'involucro ha assunto, in base al periodo storico, «*significati e funzioni differenti divenendo, di volta in volta, limite, confine rivestimento superficiale, soglia, filtro, diaframma, pelle sensibile e strumento di interazione dinamica tra l'edificio e l'ambiente*»⁵¹ oggi la situazione risulta maggiormente articolata. Come scrive Gaspari: «*Nella pratica progettuale contemporanea l'involucro edilizio sembra aver assunto, rispetto al passato, un ruolo decisamente più complesso in cui convergono oltre alle tradizionali istanze di natura formale, tecnica, strutturale, anche altre tematiche tra le quali spiccano per rilevanza e urgenza quelle del controllo ambientale e del contenimento dei consumi energetici*»⁵².

L'unico modo per soddisfare le prestazioni energetiche imposte dalla

51 Lucchi Elena, *Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio: diagnostica e interventi*, Palermo: Dario Flaccovio, 2014.

52 Gaspari, Jacopo, *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Monfalcone (GO): Edicomeditazioni, 2012.

normativa nazionale è «*porre particolare attenzione alla definizione delle prestazioni fisiche dei materiali utilizzati nei singoli sistemi costruttivi*»⁵³, ma risulta evidente che quella appena citata rimane una soluzione applicabile solo nel momento in cui si decide di intervenire su un manufatto architettonico, sia che si tratti di un intervento di nuova costruzione che di recupero dell'esistente.

Il tema della riqualificazione suscita, da un po' di anni a questa parte, sempre un certo fermento tra la popolazione che lamenta il continuo innalzarsi dei costi dell'energia e quindi dei costi di gestione degli immobili. Infatti: «*In base alle stime dell'European Insulation Manufacture Association (Eurima), l'Italia occupa il primo posto tra i paesi europei nella classifica di perdita annua di energia imputabile alle caratteristiche tecnologiche del patrimonio immobiliare esistente rispetto al quale ipotizzando un incremento delle sole prestazioni di isolamento termico dell'involucro edilizio, sarebbe possibile abbattere la domanda energetica del 30-50%. La maggior parte degli edifici costruiti nella seconda metà del '900 richiede un fabbisogno energetico che varia tra i 180 e i 250 kWh/m²a, in ragione delle soluzioni costruttive adottate, dell'esposizione e delle condizioni climatiche al contorno, contro i 20-30 kWh/m²a di una nuova costruzione basata su principi di efficienza energetica*»⁵⁴.

Risulta chiaro che la maggior parte del patrimonio edilizio nazionale non rispetta i canoni di risparmio energetico imposti dalla normativa vigente. Di conseguenza risulta essenziale, in un intervento di riqualificazione, prestare particolare attenzione all'involucro. Di seguito sono esposte alcune ragioni per cui l'involucro assume un ruolo considerevole nell'ambito di un intervento.

È ormai consuetudine pensare all'involucro come la nostra terza pelle, dopo i vestiti (considerati la nostra seconda pelle) e l'epidermide (la prima pelle), come un filtro per l'ambiente circostante. Questo concetto è spiegato in modo esaustivo dalle parole di Fiorito: «*Nella*

53 Lucchi Elena, *Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio: diagnostica e interventi*, Palermo: Dario Flaccovio, 2014.

54 Gaspari, Jacopo, *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Monfalcone (GO): Edicomeditazioni, 2012.

classificazione generale l'organismo edilizio, in assoluta analogia con l'organismo umano, viene considerato come un sistema, suddivisibile in differenti sotto-sistemi: quello strutturale, che determina lo scheletro portante dell'edificio, quello dei servizi tecnologici che determina il vettore e motore di fluidi all'interno dell'organismo stesso e, infine, quello dell'involucro edilizio che rappresenta la pelle esterna dell'edificio»⁵⁵.

Come la nostra epidermide ci protegge dalle condizioni climatiche esterne, agendo da mitigatore di temperatura e umidità, così l'involucro assume la funzione di pelle esterna dell'edificio, «*di diaframma tra organismo edilizio e ambiente circostante, di controllore e mitigatore delle azioni climatiche esterne*»⁵⁶.

Quindi le scelte che ogni progettista opera durante la progettazione dell'involucro sono di fondamentale importanza in quanto si ripercuotono in modo significativo sulla vivibilità, sul comfort e sulla salute degli utenti.

Altro motivo concerne ancora il concetto di pelle, poiché come l'epidermide è l'organo più esteso del nostro corpo così l'involucro è l'elemento tecnologico più esteso, in termini dimensionali, dell'edificio. Di conseguenza, proprio per la sua notevole estensione, svolge un ruolo fondamentale nella determinazione dei consumi di energia per riscaldamento e raffrescamento. Quindi: «*una progettazione consapevole dell'involucro edilizio potrebbe garantire notevoli benefici in ordine di possibili risparmi energetici*»⁵⁷.

Infine, dal momento in cui «*nel nostro sistema socio-economico le persone trascorrono oltre il 90% della propria vita in "luoghi confinati"*»⁵⁸, è fondamentale che in esso siano garantite condizioni di salute e benessere. «*Un materiale, per agire beneficamente sul clima interno di una casa e sull'uomo, deve avere caratteristiche di porosità, igroscopicità e traspirabilità. La traspirabilità della nostra terza pelle è caratteristica di un materiale permeabile all'aria. L'igroscopicità è la capacità di*

⁵⁵ Fiorito, Francesco, *Involucro edilizio e risparmio energetico*, Palermo: Flaccovio, 2009.

⁵⁶ *Ibidem*

⁵⁷ *Ibidem*

⁵⁸ http://www.anab.it/documento/download/id/435/Abstract_Pavullo.pdf

un materiale di assumere o cedere vapore acqueo influenzando il tal modo sul clima interno; la terra cruda e l'argilla hanno notevoli capacità igroscopiche»⁵⁹.

Quindi, l'impiego di materiali traspiranti, accompagnati da terra cruda e argilla, permettono di garantire adeguate condizioni di salubrità e comfort negli ambienti interni.

⁵⁹ <https://www.zerolab.biz/2018/03/16/la-casa-la-terza-pelle/>

L'IMPIEGO DELLA PAGLIA
IN ARCHITETTURA

In questo capitolo si riporta una parte del lavoro di ricerca svolto nell'ambito della presente tesi di laurea. La prima parte del capitolo è dedicata all'approfondimento del materiale paglia, con particolare riferimento alla paglia impiegata nell'ambito delle costruzioni. I paragrafi successivi sono volti alla comprensione delle tecniche di impiego di questo materiale in ambito architettonico, sia per quanto riguarda gli interventi di nuova costruzione che quelli di riqualificazione. L'ultima parte del capitolo riporta delle schede di progetto: sono state selezionate alcune esperienze realizzate in Italia e nel mondo, allo scopo di comprendere come è stato impiegato finora questo materiale nell'ambito della riqualificazione edilizia.

La paglia come materiale da costruzione

*«La paglia sembra leggera e fragile;
la maggior parte della gente non sa quanto pesante essa sia.
Se la gente conoscesse il vero valore della paglia,
si potrebbe verificare una rivoluzione umana che diventerebbe
abbastanza potente da cambiare la nazione e il mondo.»*

Masanobu Fukuoka, *La rivoluzione del filo di paglia*,
Firenze: Libreria editrice fiorentina, 1983.

Quando si parla di paglia, la prima cosa da chiarire è il fatto che non si tratta di fieno, anche se morfologicamente simili non sono sinonimi utilizzati per indicare uno stesso prodotto.

Il fieno è semplicemente erba essiccata, che dopo esser stata compattata viene utilizzata per nutrire gli animali da allevamento.

La paglia è un prodotto di scarto dell'agricoltura, più precisamente deriva dalla coltivazione dei cereali e si ottiene al termine del processo di maturazione e trebbiatura. Si tratta quindi dei fusti della pianta secca, detti più propriamente "culmi", ottenuti a seguito della rimozione della spiga e della granella.

La composizione chimica della paglia è molto simile a quella del legno: sono presenti gli stessi componenti in percentuale diversa, che variano in base alla natura del cereale. Tendenzialmente, la paglia è composta da lignina per il 20-30%, da cellulosa per il 40-50% e da emicellulosa per il 20%. Nella pagina successiva sono riportate, a titolo esemplificativo, le composizioni chimiche di due tipologie di paglia da cereale: la paglia di segale e la paglia di riso (Fig.36, Fig.37).

La paglia più diffusa è quella che deriva dalla coltivazione dei cereali, che siano di semina autunno-vernina come l'orzo, il fru-

mento e l'avena o primaverile come il mais e il riso. È prodotta in tutto il mondo (Fig.38, Fig.39) per le grandi quantità di cereali e prodotti da essi derivanti che vengono consumati in massa. Per quanto riguarda l'impiego della paglia in architettura, anche se si riconosce che alcuni tipi di paglia presentano caratteristiche migliori rispetto ad altri (per esempio la paglia di riso), la questione centrale riguarda la distanza del punto di raccolta della paglia dal cantiere: si preferisce la paglia che è più vicina al sito. Altra caratteristica che può influire, seppur non in maniera significativa, nel preferire un tipo di paglia piuttosto che un'altra è la lunghezza del fusto poiché fusti più lunghi permettono di ottenere balle più compatte e omogenee e consentono una migliore adesione dell'intonaco. Di seguito sono brevemente descritti i principali tipi di cereali da cui può derivare la paglia. **Fruento** Presenta uno stelo di medie dimensioni, più precisamente oscilla tra gli 80 e i 90 cm di lunghezza. Si divide in grano tenero e grano duro: il primo, di gran lunga più importante, è diffuso in tutti i Paesi a clima temperato del continente Eurasiatico e Africano e negli ultimi cinque secoli si è diffuso anche nelle Americhe e in Australia; il grano duro invece è coltivato in un'area molto meno estesa, circa il 9% della superficie totale a frumento, in particolare nell'area mediterranea e medio orientale (Fig.40).

In generale, il frumento è coltivato in zone del mondo molto diverse tra loro, come per esempio le regioni montuose equatoriali, le regioni

Paglia di segale		Paglia di riso	
Composizione chimica		Composizione chimica	
Cellulosa	21%	Cellulosa	40%
Emicellulosa	39%	Emicellulosa	25%
Lignina	15%	Lignina	15%
Proteine	0,8%	Ceneri e altri	20%
Ceneri	5%	componenti minori	

Fig. 36 Composizione chimica della paglia di segale.

Fonte: A.R. Stainforth, *Straw For Fuel, Feed and Fertiliser*, Cornell 1982, Farming Press, Adriano Oddo, Vetrino a Bolzano, "Costruire", numero 255 giugno 2005.

Fig. 37 Composizione chimica della paglia di riso.

Fonte: enama.it

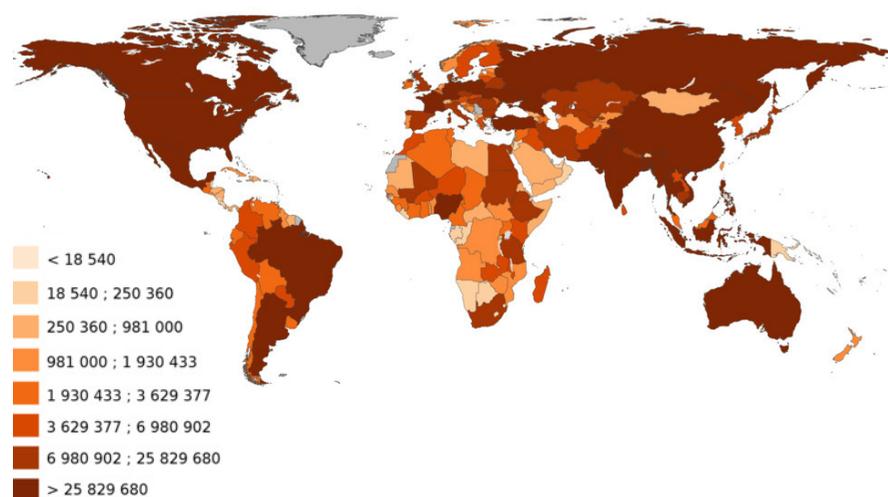


Fig. 38 Produzione di cereali nel mondo.
Fonte: FAO, 2014.

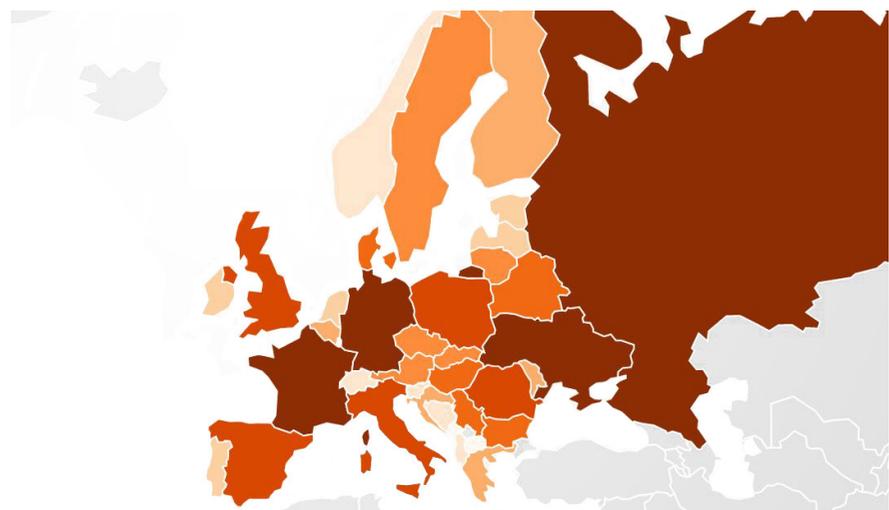


Fig. 39 Produzione di cereali in Europa.
Fonte: FAO, 2014.

tropicali, subtropicali temperate, fino ad arrivare ai climi più freddi, anche se nelle zone temperate trova le migliori condizioni ambientali per cui fornisce rese più elevate. Per quanto riguarda il contesto italiano, le regioni maggiori produttrici di frumento sono Emilia-Romagna, Sicilia, Puglia, Lombardia, Marche, Toscana e Piemonte.

Segale la segale è il cereale vernino con steli più lunghi infatti, il fusto può superare i 150 cm. Tra i cereali, la segale occupa uno degli ultimi posti nel mondo sia per superficie investita che per produzione. È un cereale tipico dei climi freddi, per cui si trova diffusamente coltivata nei Paesi del nord d'Europa (come Russia, Polonia e Germania) e del Canada, negli Stati Uniti e in Giappone, ma è presente anche in Paesi molto freddi come la Norvegia (Fig. 41). In Italia, le regioni maggiormente interessate dalla coltivazione della segale sono Lombardia, Trentino-Alto Adige, Toscana e Calabria.

Avena presenta una lunghezza del fusto compresa tra i 60 e i 150 cm. Viene coltivata soprattutto in Europa e America settentrionale a nord del 40° di latitudine, ma si può trovare anche in Paesi nordici come Svezia e Finlandia. Le coltivazioni di avena più estese si trovano in Polonia mentre, solo in Scozia risulta essere la coltura dominante coprendo più del 50% di area coltivata. In Italia la coltura è quasi scomparsa al Nord, mentre è ancora presente in Puglia, Basilicata, Lazio.

Orzo la lunghezza del culmo può variare da 15 cm (in forme selvatiche) a 120 cm. Le prime coltivazioni comparvero in Medio Oriente per poi diffondersi in tutto il mondo. È molto coltivato specialmente dove non è possibile la coltivazione del frumento a causa del clima troppo freddo. I maggiori Paesi produttori di orzo a livello mondiale sono Canada, Stati Uniti, Cina, India, Turchia e Marocco. Mentre in Europa si coltiva principalmente in Russia, Francia, Gran Bretagna, Germania, Danimarca, Spagna, Polonia e Repubblica Ceca (Fig. 43).

Riso presenta uno stelo di dimensioni comprese tra 30 cm e 50 cm. Si tratta di un'antichissima coltivazione, originaria del Sud-est asiatico a clima tropicale e subtropicale. Nel mondo si producono oltre 550 milioni di tonnellate di riso all'anno su oltre 150 milioni di ettari, soprattutto nelle regioni a clima caldo e molto umido dei tropici e dei subtropici (Fig.44). In Italia la coltivazione di riso è concentrata soprattutto nella pianura padana centro-occidentale in riva sinistra

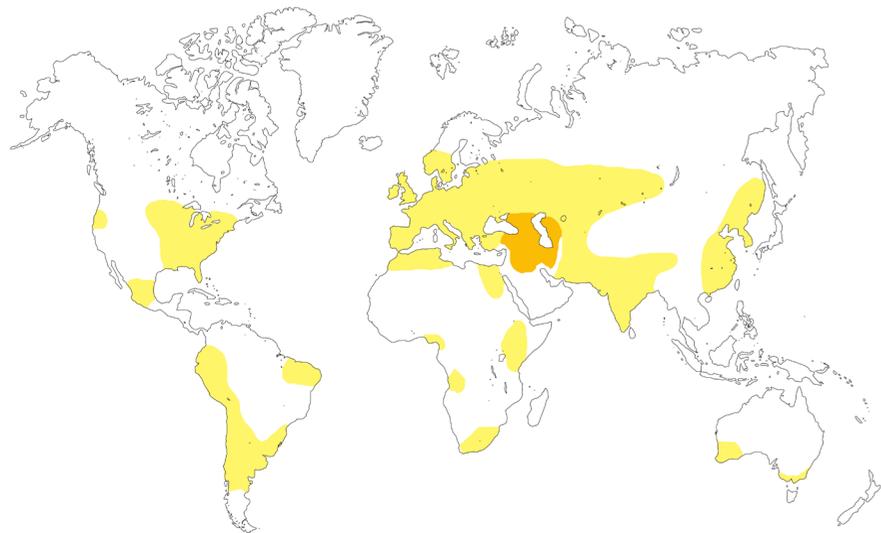


Fig. 40 Diffusione della coltivazione di frumento nel mondo.
Fonte: .cialombardia.org

■ Area d'origine
■ Area di coltivazione

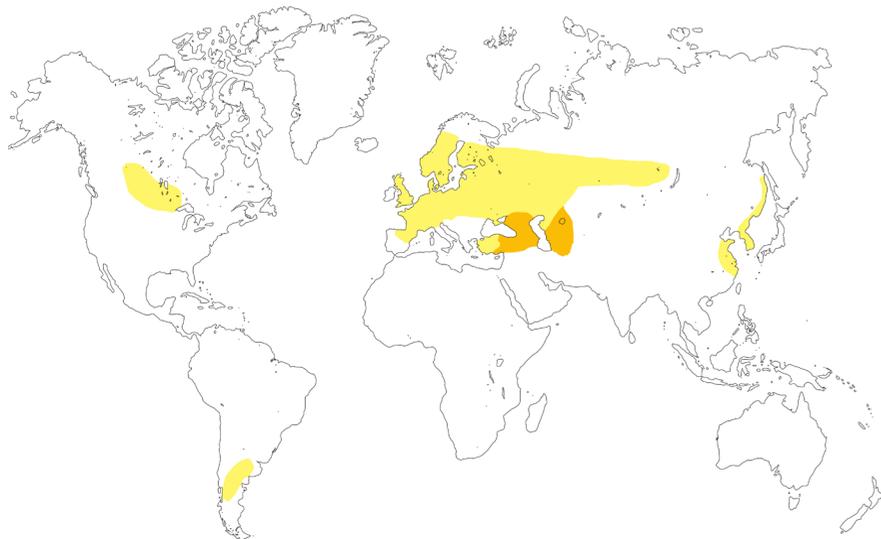


Fig. 41 Diffusione della coltivazione di segale nel mondo.
Fonte: .cialombardia.org

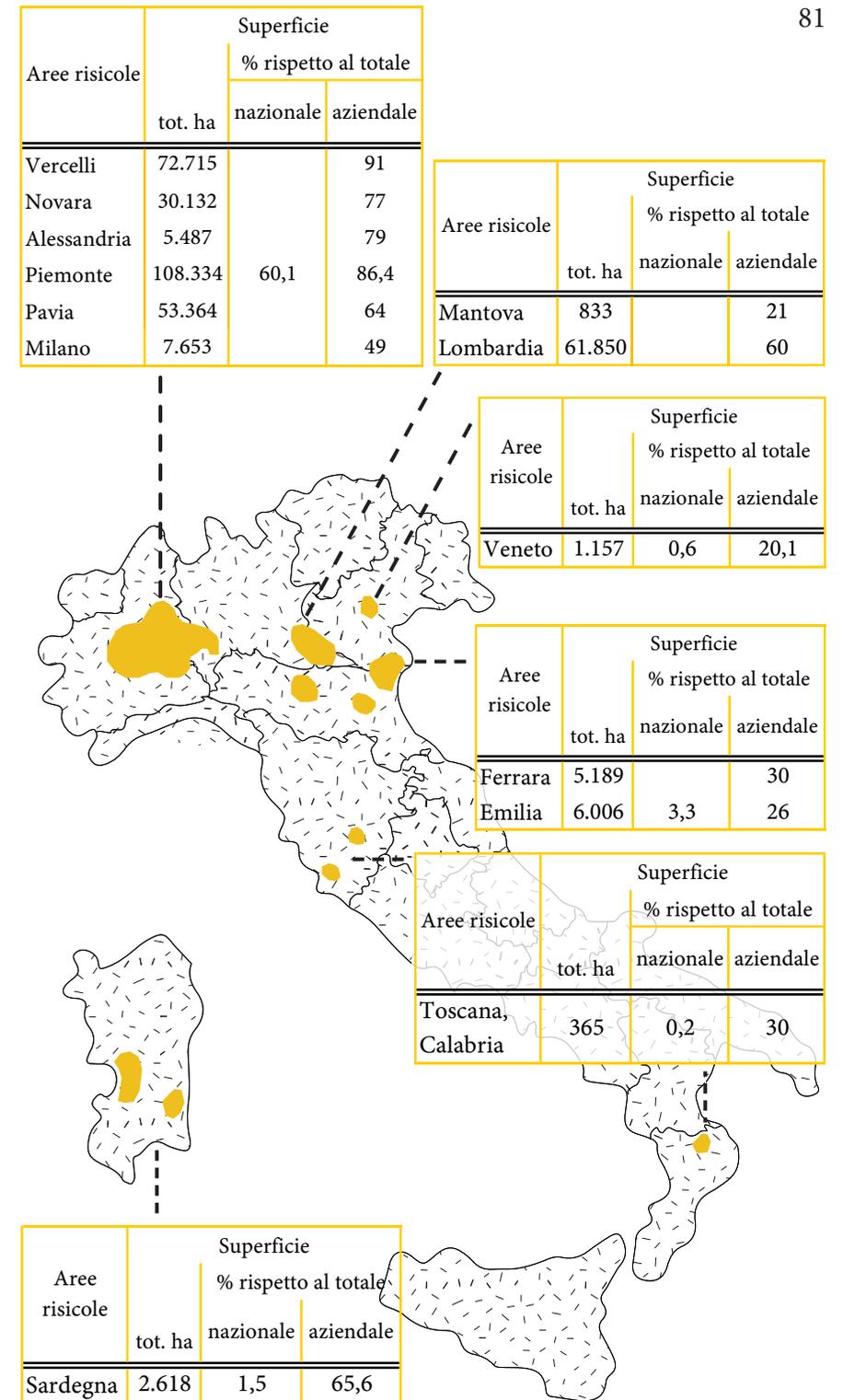


Fig. 42 Superficie coltivata a riso in Italia. Elaborazione personale.
Fonte: Ente Nazionale Risi, 1894; www.ciaolombardia.org

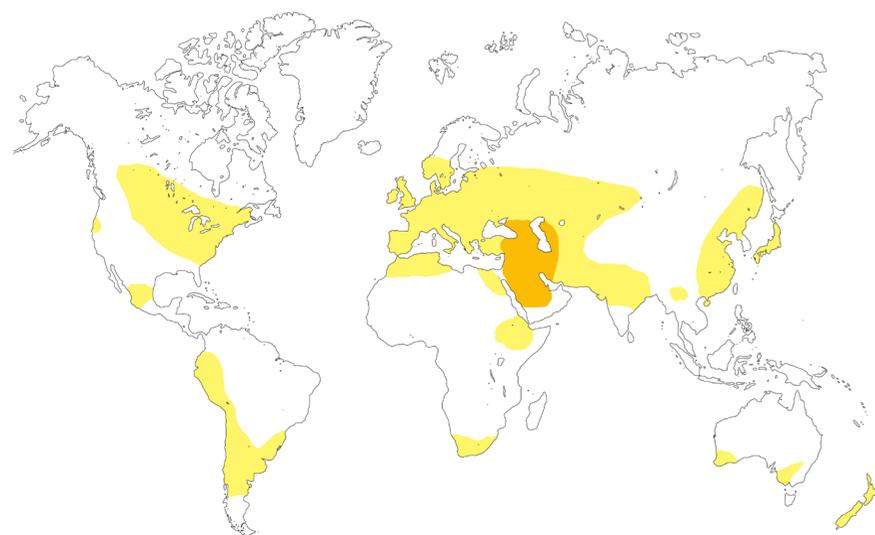


Fig. 43 Diffusione della coltivazione di orzo nel mondo.

Fonte: .cialombardia.org

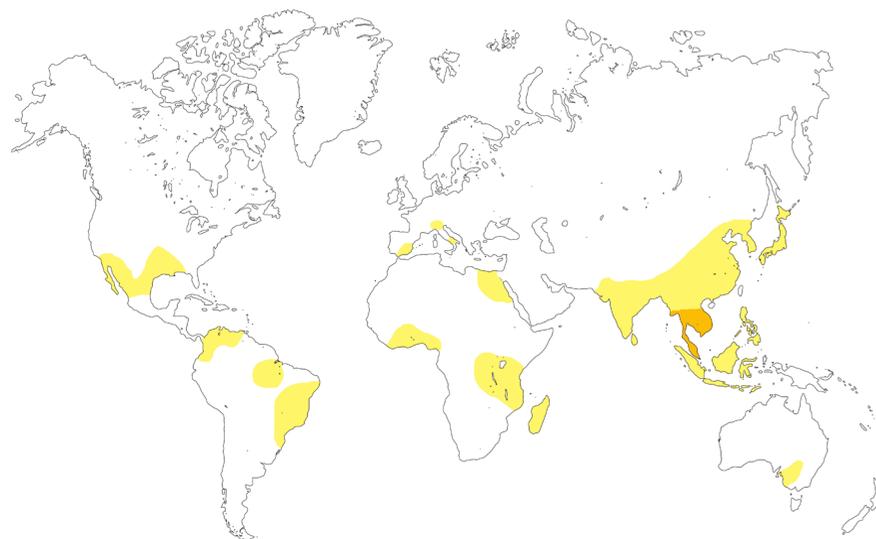
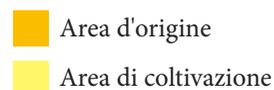


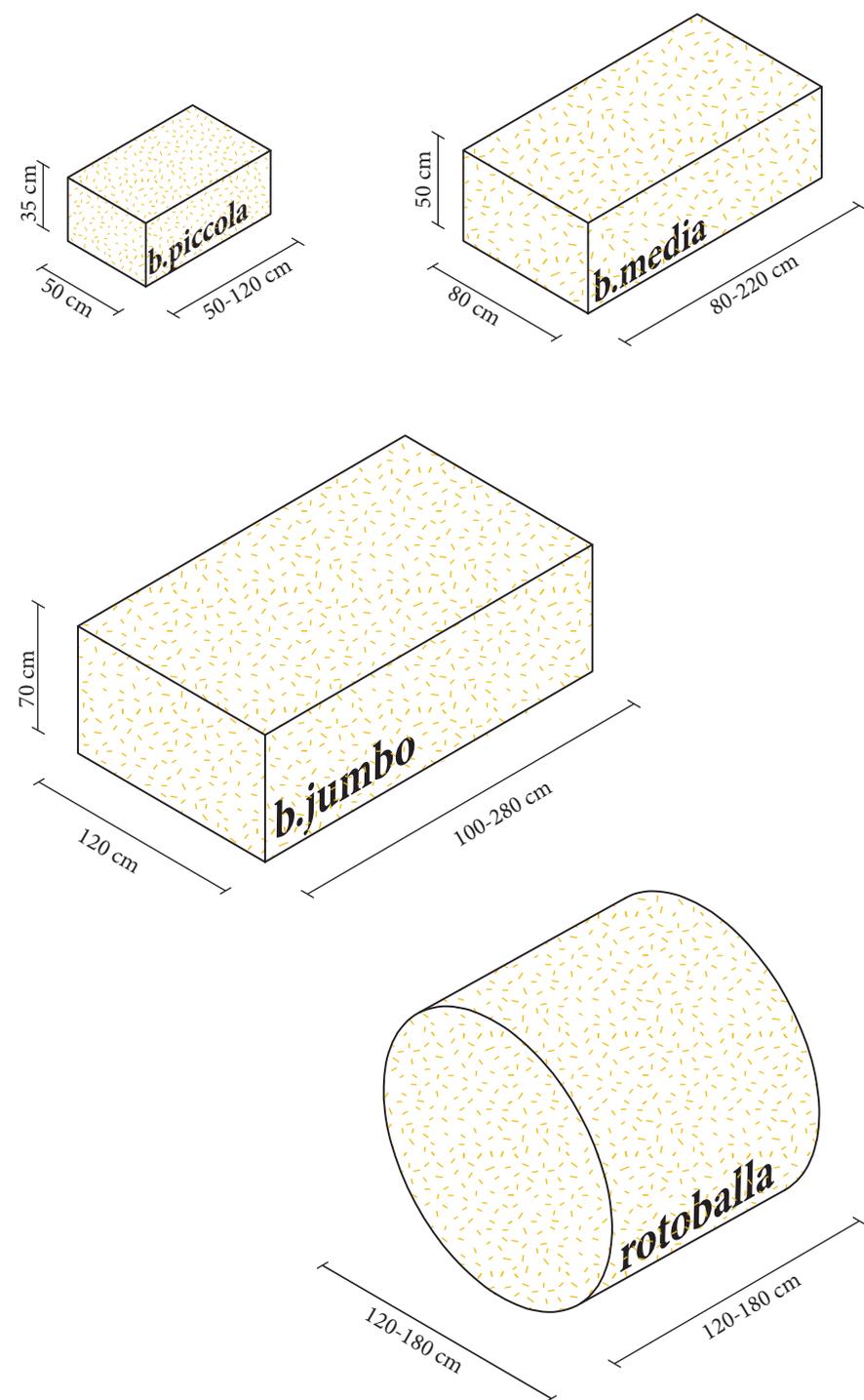
Fig. 44 Diffusione della coltivazione di riso nel mondo.

Fonte: .cialombardia.org

del Po, infatti il 95% della produzione nazionale del riso in Italia è concentrato nelle province di Novara, Vercelli e Pavia (Fig. 42). Per quanto concerne l'uso della paglia di riso in architettura, quest'ultima risulta essere la più adatta perché contiene alto contenuto di Silice (SiO_2 , 20% del volume), che la rende più resistente alla decomposizione. A renderla la più adatta incide anche un fattore morfologico: la superficie dello stelo possiede dei "peli" microscopici che aumentano l'attrito con il resto della paglia rendendo le balle molto più compatte. Inoltre, l'alto contenuto di silice la rende inutilizzabile per l'alimentazione animale per cui viene utilizzata principalmente come lettiera, ma l'attuale utilizzo si aggira intorno al 15-30% della produzione. Quindi, la paglia di riso risulta essere un vero e proprio scarto agricolo.

Prima dell'invenzione della macchina imballatrice, la paglia veniva raccolta in "fascine". Queste ultime, erano (ma in alcune parti del mondo lo sono ancora) tipiche della raccolta manuale della paglia ed erano dimensionate in modo da essere trasportate a braccia da una sola persona. A partire dal 1890, con l'invenzione della macchina imballatrice, si è iniziati a compattare la paglia per ridurne il volume, facilitarne la raccolta, il trasporto e lo stoccaggio. Da allora che si inizia a parlare di balle, quando la paglia compattata assume una forma prismatica, e rotoballe quando, invece, assumono una forma cilindrica. Tutte le balle presentano dei fili di legatura, disposti parallelamente al lato lungo della balla e annodati entrambi sullo stesso lato. Si usa, di solito, il nylon ma è possibile utilizzare anche corda, sisal o canapa. Inoltre, in base a quanto sono tesi gli spaghi, si può valutare la compattezza della balla di paglia. Tendenzialmente, balle leggere e poco pressate sono più facili da spostare quindi sono preferite dai contadini, mentre balle molto pressate sono preferibili per impieghi costruttivi per la maggiore resistenza ai carichi e l'assenza di ossigeno all'interno da cui dipende l'elevata resistenza al fuoco.

Le proprietà delle balle cambiano a seconda della direzione in cui sono disposte: posizionate di piatto resistono meglio ai carichi verticali sia perché la superficie d'appoggio è maggiore sia perché le fibre sono disposte perpendicolarmente alla forza di carico, mentre posizionate



di coltello espongono i fili di legatura verso l'esterno rendendoli più sensibili nei confronti di pericoli quali incendi, etc.

Le dimensioni delle balle di paglia dipendono dalla macchina imballatrice, ma tendenzialmente possono essere prodotte nei seguenti formati:

- **balle piccole** di dimensioni 35 cm di altezza, 50 cm di larghezza e 50-120 di lunghezza con densità compresa tra 80 e 120 kg/m³;
- **balle medie** di dimensioni 50 cm di altezza, 80 di larghezza e 80-220 di lunghezza;
- **balle jumbo** di dimensioni 70 cm di altezza, 120 di larghezza e 100-280 cm di lunghezza con densità compresa tra 180 e 200 kg/m³;
- **rotoballe** di diametro 120-180 cm e lunghezza 120-150 cm con peso compreso tra 400 e 600 kg.

Quando ci si appresta ad utilizzare la paglia in edilizia è necessario accertarsi che le balle di paglia abbiano determinate caratteristiche:

- umidità <15% o umidità relativa >70%;
- densità compresa tra gli 80 kg/m³ e i 120 kg/m³. Di conseguenza, il peso deve oscillare tra i 16 e i 30 kg;
- non deve contenere impurità cioè tracce di erba o fiori poiché marcendo riducono le prestazioni della balla;
- devono essere state stoccate per un periodo di almeno due mesi prima di poter essere utilizzate.

Le proprietà fisiche della paglia

Isolamento termico

Le proprietà di isolamento termico delle balle di paglia dipendono dalla densità delle balle, dalla direzione delle fibre (parallele o perpendicolari alla direzione del flusso di calore) e dal contenuto di umidità della paglia.

Negli anni, si sono susseguiti molti studi volti alla definizione del valore di conducibilità termica della paglia. È importante tenere a mente che il valore risultante dai test dipende dalle condizioni in cui è svolto il test, dalla densità e dal valore di umidità della paglia.

Come scrivono Minke e Mahlke⁶⁰, alcuni test eseguiti in Germania e Austria hanno confermato un valore di conducibilità termica $\lambda = 0,045$ W/mK per balle di paglia posizionate di coltello (steli perpendicolari alla direzione del flusso di calore) e $\lambda = 0,06$ W/mK per balle posizionate di piatto (steli paralleli alla direzione del flusso di calore). Gli stessi test riportano dei dati che riguardano la trasmittanza termica di due pareti realizzate con balle di paglia. Per la prima parete, composta da balle di paglia posizionate di coltello dallo spessore di 35 cm e da due strati di intonaco dallo spessore totale di 9 cm, il valore di trasmittanza termica risulta essere $U=0,12$ W/m²K, e diventa $U=0,14$ W/m²K se si considera il contributo della struttura in legno nel caso si stia impiegando una tecnica costruttiva con balle di paglia non portati (Fig.45). Mentre la seconda parete, in cui l'unica differenza è la posizione delle balle poiché disposte di piatto, il valore di trasmittanza termica si abbassa a $U=0,11$ W/m²K e $U=0,12$ W/m²K nel caso si stia impiegando una tecnica costruttiva con balle di paglia

⁶⁰ Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

non portati (Fig. 46).

I dati divulgati dall'associazione tedesca FASBA⁶¹, mostrano un valore di conducibilità termica $\lambda = 0,052$ W/mK per balle posizionate di coltello (fibre perpendicolari alla direzione del flusso di calore) mentre non dichiarano un valore per balle posizionate di piatto.

Inoltre, alcuni autori hanno realizzato degli studi comparati che mettono in relazione alcuni valori di conducibilità termica misurati negli anni da vari soggetti. Nelle tabelle di seguito sono riportati gli studi condotti da Atkinson nel 2008⁶²(fig. 47) e dalla Jones nel 2006⁶³ e a cura di Mark Bigland-Pritchard (fig. 48).

Negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi a livello accademico⁶⁴ al fine di indagare la conducibilità termica della paglia e alcuni risultati sono riportati nell'articolo intitolato *Energy performance of straw houses: two case studies in the northern part of Italy*⁶⁵ e presentato al 37° UIT Heat Transfer Conference tenutosi a Padova nel giugno 2019. In fig. 49 sono stati riportati i suddetti valori di conducibilità termica. Infine, nella tabella in fig. 50 sono riportati tutti i valori di conducibilità termica citati in questo paragrafo in modo da poterli confrontare più agevolmente.

⁶¹ FASBA, Linee guida per le costruzioni in paglia, 2014.

⁶² Presenti nella tesi: Bertorello, Anna Rita, *Straw(w)isolami: analisi tecnologica di edifici esistenti isolati con balle di paglia*, Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 2014.

⁶³ Jones, Barbara, *Costruire con le balle di paglia: manuale pratico per la progettazione e la costruzione*, Firenze: Terra Nuova edizioni, 2014.

⁶⁴ Cascone S, Catania F, Gagliano A, Sciuto G., *Energy performance and environmental and economic assessment of the platform frame system with compressed straw*, Energy & Buildings 166, p. 83-92, 2018.

D'Alessandro F., Bianchi F., Baldinelli G., Rotili A., Schiavoni S., *Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance*, Journal of Building Engineering 11, p. 56-68, 2017.

Asdrubali F., D'Alessandro F., Schiavoni S., *A review of unconventional sustainable building insulation materials*, Sustainable Materials and Technologies 4,p. 1-17,2015.

⁶⁵ Mutani G., Azzolino M.C., M. Macri M. e Mancuso S., *Energy performance of straw houses: two case studies in the northern part of Italy*, Politecnico di Torino, 2019.

Stratigrafia	spessore [m]	λ [W/mK]	d/λ [m ² K/W]
Adduttanza interna			0,13
Intonaco in terra	0,025	0,8	0,031
Rete portaintonaco	0,02	0,13	0,15
Balle di paglia (di coltello)	0,35	0,045	7,777
Rete portaintonaco	0,02	0,13	0,15
Intonaco in terra	0,025	0,87	0,02
Adduttanza esterna			0,04
U tot			U=0,12 W/m²K
U tot (inclusa strutt. in legno)			U=0,14 W/m²K
Stratigrafia	spessore [m]	λ [W/mK]	d/λ [m ² K/W]
Adduttanza interna			0,13
Intonaco in terra	0,025	0,8	0,031
Rete portaintonaco	0,02	0,13	0,15
Balle di paglia (di piatto)	0,5	0,06	8,333
Rete portaintonaco	0,02	0,13	0,15
Intonaco in terra	0,025	0,87	0,02
Adduttanza esterna			0,04
U tot			U=0,11 W/m²k
U tot (inclusa strutt. in legno)			U=0,12 W/m²K

Fig. 45, Fig. 46 Calcolo del valore U.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

Fonte	Densità [kg/m ³ K]	λ fibre par. (di piatto) [W/m ² K]	λ fibre perp. (di coltello) [W/m ² K]
McCabe (Jones, 2002)	133	0.061	0.054
Andersen (Andersen,2004)	90	0.060	0.056
Andersen (Andersen,2004)	75	0.057	0.052
Germania e Austria (Minke e Mahlke,2005)	n.d.	0.060	0.045
Oliva (Oliva e Courgey,2010)	80-120	0.06-0.075	0.04-0.055

Fig. 47 Studi comparati sulla conducibilità termica della paglia.

Fonte: Bertorello, Anna Rita, *Stra(w)isolami: analisi tecnologica di edifici esistenti isolati con balle di paglia*, Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 2014.

Ricercatori	Mc Cabe	Mc Cabe	Sandia Labs	ORNL	CEC/ATI	ORNL	Ship Harbour
Anno	1993	1993	1994	1996	1997	1998	1995
Posizione balle	piatto	coltello		piatto	piatto	piatto	piatto
Tipo di paglia	Grano	Grano	Grano	Riso	Riso	Grano	Grano, avena, Orzo
Densità [kg/m ³]	133	133	83		107	107	128
λ [W/mK]	0,061	0,054	0,054	0,153	0,128	0,1	0,1

Fig. 48 Risultati delle misure di conducibilità termica. Rielaborazione personale.
Fonte: Jones, Barbara, *Costruire con le balle di paglia: manuale pratico per la progettazione e la costruzione*, Firenze: Terra Nuova edizioni, 2014.

Densità balla di paglia [kg/m ³]	Conducibilità termica [W/mK]	
	di piatto	di coltello
62	0.082	
75	0.057	0.052
81		0.057
90	0.05-0.06*	0.05-0.06*
100		0.038
150		0.048
200	0.06	
250	0.07	
300	0.075	
350	0.08	

* direzione non specificata

Fig. 49 Studi comparati sulla conducibilità termica della paglia.

Fonte: Mutani G., Azzolino M.C., M. Macri M. e Mancuso S., *Energy performance of straw houses: two case studies in the northern part of Italy*, Politecnico di Torino, 2019.

Fonte	Autore	Anno	Posizione balla	Densità balla [kg/m ³]	λ [W/mK]
Jones	McCabe	1993	piatto	133	0,061
Jones	McCabe	1993	coltello	133	0,054
Jones	Sandia Labs	1994	coltello	83	0,054
Jones	ORNL	1996	piatto	n.d.	0,153
Jones	CEC/ATI	1997	piatto	107	0,128
Jones	ORNL	1998	piatto	107	0,1
Jones	Ship Harb.	1995	piatto	128	0,1
Atkinson	Andersen	2004	piatto	75	0,057
Atkinson	Andersen	2004	coltello	75	0,052
Atkinson	Andersen	2004	piatto	90	0,06
Atkinson	Andersen	2004	coltello	90	0,056
Atkinson	Minke e M.	2005	piatto	n.d.	0,06
Atkinson	Minke e M.	2005	coltello	n.d.	0,045
Atkinson	Oliva	2010	piatto	80-120	0,06-0,075
Atkinson	Oliva	2010	coltello	80-121	0,04-0,055
	FASBA	2014	coltello	n.d.	0,052
Mutani, et al.		2019	piatto	62	0,082
Mutani, et al.		2019	piatto	75	0,057
Mutani, et al.		2019	coltello	75	0,052
Mutani, et al.		2019	coltello	81	0,057
Mutani, et al.		2019	non spec.	90	0,05-0,06
Mutani, et al.		2019	coltello	100	0,038
Mutani, et al.		2019	piatto	150	0,06
Mutani, et al.		2019	coltello	150	0,048
Mutani, et al.		2019	non spec.	200	0,06
Mutani, et al.		2019	non spec.	250	0,07
Mutani, et al.		2019	non spec.	300	0,075
Mutani, et al.		2019	non spec.	350	0,08

Fig. 50 Comparazione valori di conducibilità termica della paglia.
Elaborazione personale

Isolamento acustico

La paglia, essendo un materiale dotato di una buona massa e caratterizzato da un'elevata presenza di pori e micropori nella sua struttura interna, risulta essere un buon isolante acustico. Nel caso specifico di pareti in balle di paglia intonacate su entrambi i lati, le proprietà di isolamento acustico migliorano in confronto ad una parete in balle di paglia non intonacate perché oltre ad un elemento dotato di massa (la paglia) è stato inserito un elemento rigido (l'intonaco) e, inoltre, l'alternanza di materiali crea un disaccoppiamento acustico.

Ovviamente, sono stati condotti degli studi⁶⁶ allo scopo di verificare l'esattezza delle precedenti affermazioni.

In Australia, sono stati condotti dei test⁶⁷ su una parete in paglia spessa 45 cm: all'interno c'erano tra i 114 e i 117 dB, mentre all'esterno sono stati misurati tra i 61 e i 77 dB con uno spettro di frequenza variabile dai 500 ai 10000 Hz. Ne risulta un abbattimento del livello di rumore tra i 43 e i 55 dB.

Lo studio condotto dalla *Technical University di Eindhoven*⁶⁸ dimostra che il valore di fonoisolamento di una parete composta da 45 cm di paglia con densità 120/130 kg/m³ e due strati di intonaco in terra dallo spessore totale di 2,5/3,5 cm risulta uguale a quello di pareti costituite da altri materiali per le basse frequenze, mentre risulta più alto se riferito alle alte frequenze (Fig.51).

⁶⁶ Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

⁶⁷ *Ibidem*

⁶⁸ *Ibidem*

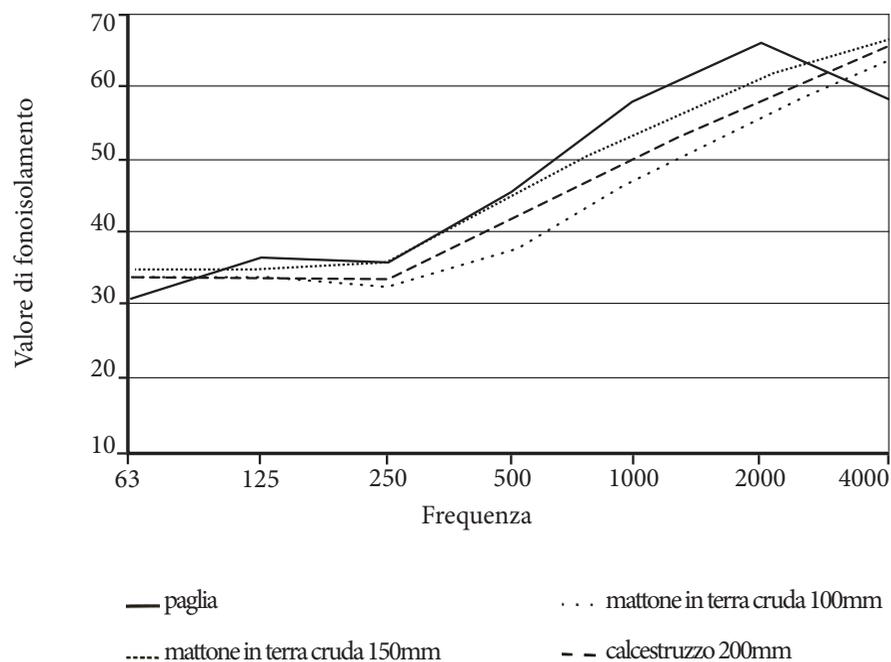


Fig. 51 Valore di fonoisolamento di alcuni materiali, in base alla frequenza.
Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

Resistenza al fuoco

La paglia sfusa presenta un alto grado di infiammabilità, infatti nei cantieri delle case in paglia il rischio di incendio è un fattore che desta sempre preoccupazioni anche se per minimizzarlo basta provvedere a mantenere sempre pulito il cantiere e rasare la paglia una volta posizionata. Non si può dire lo stesso, invece, per le pareti in balle di paglia. Solitamente, per i materiali da costruzione la resistenza al fuoco è indicata dalle sigle F30, F60, F90 e F120 che indicano la capacità di un elemento di mantenere le funzioni essenziali in caso di incendio per un periodo variabile dai 30 ai 120 minuti.

Degli studi condotti in Austria⁶⁹ dimostrano che una palla di paglia non trattata di densità 120 kg/m^3 possiede un grado normale di infiammabilità. Per contro, alcuni test sviluppati in Austria e Germania⁷⁰ affermano che una parete in balle di paglia intonacata su un lato con intonaco in terra cruda e sull'altro con intonaco di calce è classificabile con la sigla F90. Inoltre, degli studi americani riportano una resistenza al fuoco di 120 minuti. Questi valori così elevati di resistenza al fuoco sono riconducibili sia alle proprietà intrinseche dell'intonaco sia all'elevata compressione delle balle che non permette il passaggio dell'ossigeno, il quale potrebbe alimentare la combustione. Inoltre, qualora l'intonaco di rivestimento fosse fessurato, si formerebbe uno strato esterno di paglia carbonizzata che, come nel caso del legno, fornisce protezione agli strati sottostanti impedendo il passaggio di ossigeno.

⁶⁹ *Ibidem*

⁷⁰ *Ibidem*

Resistenza all'umidità

Come tutti i materiali di origine naturale, la paglia possiede caratteristiche di igroscopicità cioè tende ad assorbire l'acqua presente nell'ambiente circostante. L'igroscopicità quindi, è una caratteristica propria di ogni materiale ma ciò non vuol dire che non ci possano essere delle variazioni interne dovute alla specifica microstruttura: per esempio la paglia di segale, a parità di condizioni di umidità dell'aria, assorbe più umidità rispetto alla paglia di grano (fig. 52).

Inoltre, è importante tenere a mente che nelle balle di paglia il contenuto di umidità non deve superare il 14%, altrimenti si rischia di incorrere in danni di varia entità: dalla formazione di muffe e funghi fino alla completa disintegrazione della balla. Ovviamente è una condizione da rispettare in tutte le fasi di costruzione di un edificio in paglia. Bisogna verificare il contenuto di umidità nel momento in cui si raccoglie e imballa la paglia e poi, durante la costruzione è necessario porre attenzione al luogo in cui verrà stoccata e alle condizioni di lavoro in cantiere. Infine, nella fase d'uso dell'edificio si ha l'azione combinata dell'umidità prodotta all'interno e quella proveniente dall'ambiente esterno: in questo caso è l'intonaco che fa la differenza. Gli intonaci, come del resto tutti i materiali, possiedono un valore di coefficiente di resistenza alla diffusione di vapore acqueo (è indicato con la lettera greca μ ed è adimensionale) diverso in base alla composizione: come è visibile in fig. 53, gli intonaci a base di sabbia, limo e argilla hanno un valore di μ basso. Ciò vuol dire che permettono al vapore acqueo di migrare in entrambe le direzioni evitando ristagni di umidità all'interno della muratura in paglia.

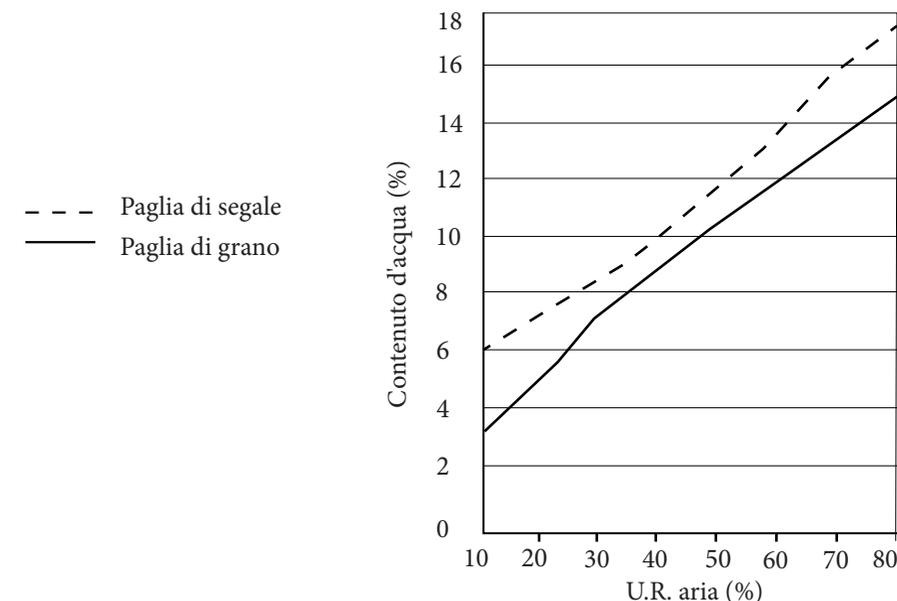


Fig. 52 Curve di assorbimento della paglia di segale e paglia di grano.
Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

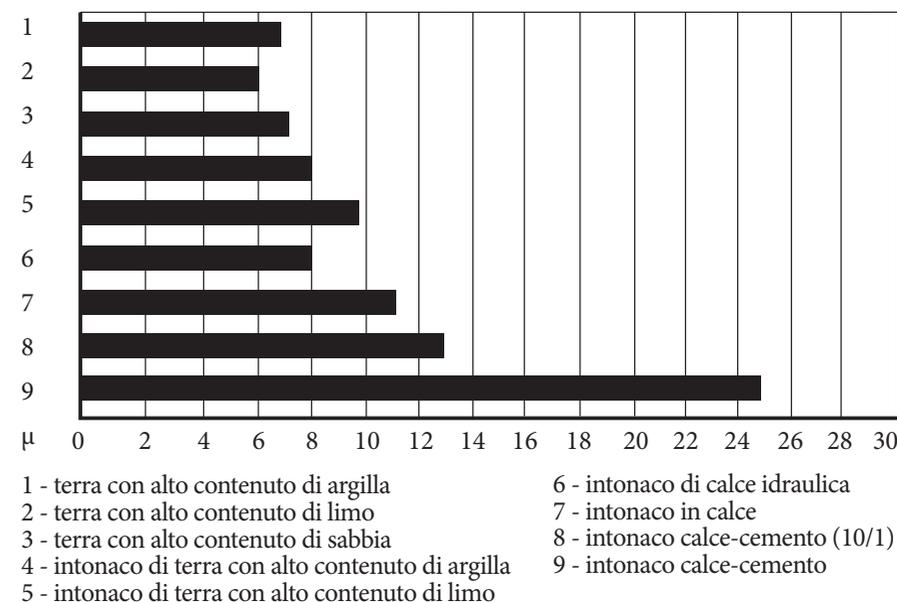


Fig. 53 Valori di μ degli intonaci in terra.
Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

Perchè la paglia?

Oggi la paglia non è considerata un materiale alla pari dei materiali da costruzione tradizionali. Di seguito, si elencano alcuni motivi per i quali la paglia ha tutte le carte in regola per diventare un materiale da costruzione comunemente utilizzato, nell'ottica di un'architettura orientata verso la sostenibilità.

- È reperibile facilmente in gran parte del pianeta, in quanto i cereali sono coltivati e consumati in tutto il mondo.
- È rinnovabile perché i cereali vengono coltivati e raccolti ogni anno.
- È uno scarto dell'agricoltura che può essere reimpiegato al posto di essere bruciato provocando danni all'ambiente.
- È sostenibile: la sua Embodied energy è molto minore rispetto ad altri materiali da costruzione e la sua Carbon footprint è pari a zero.
- È durevole nel tempo: necessita di un'attenta progettazione e di piccoli accorgimenti nei confronti dell'umidità, ma può durare secoli come testimoniano gli edifici risalenti alla seconda metà dell'800 in Nebraska.
- È un ottimo isolante termico, possiede un buon comportamento in caso di incendio ed è un ottimo materiale fonoassorbente.
- Possiede un costo estremamente ridotto rispetto ai materiali da costruzione tradizionali.
- Permette di creare un ambiente salubre: se correttamente protetta con intonaci naturali permette al vapore acqueo di migrare dall'interno dell'abitazione all'esterno, evitando la formazione di muffe e condense. Nonostante i molteplici vantaggi, purtroppo alcune idee sono ancora radicate nel pensiero comune anche essendo inesatte. Solitamente si immagina la paglia come rifugio di insetti e roditori ma non è così: l'elevata densità delle balle e i trattamenti superficiali ne impediscono il passaggio. Inoltre, la paglia non costituisce una fonte di nutrimento per insetti e roditori anzi, a causa dell'alto contenuto di silice, risulta inadatta per l'alimentazione degli insetti. Altro mito da sfatare riguarda le allergie: la paglia non è fieno, per cui è impossibile incorrere nel cosiddetto "raffreddore da fieno". In ultimo, le balle di paglia non risultano particolarmente inclini alla formazione di muffe (a patto che vengano osservati a adeguati accorgimenti in ogni fase di costruzione e nella fase di utilizzo) né particolarmente sensibili in caso di incendio.

Tra nuova costruzione e riqualificazione: tecniche costruttive

Conosciute da ormai più di un secolo, le costruzioni in paglia si stanno diffondendo sempre più non solo a livello mondiale, ma anche sul territorio nazionale.

Una certa tradizione costruttiva e di sperimentazione progettuale è ben radicata in Paesi come Francia, Svizzera, Germania ed Austria. Per quanto riguarda il contesto italiano la maggioranza degli esempi è concentrata tra Centro e Nord Italia. Si tratta ancora di edifici o complessi edilizi localizzati fuori dal centro urbano, in grandi zone agricole o in ampi spazi verdi prossimi alla città, contraddistinti da una bassa densità edilizia.

La scelta di costruire e riqualificare con le balle di paglia riflette una società che mostra, giorno dopo giorno, maggiore sensibilità verso uno stile di vita sostenibile e nei confronti dell'ambiente. Inoltre, le costruzioni in paglia rispondono in molti modi al problema energetico poiché forniscono un buon isolamento termico restando un materiale sano, che possiede un'energia grigia quasi nulla, che non emette sostanze inquinanti (VOC) ma anzi le trattiene.

Dal punto di vista tecnologico, esistono vari metodi costruttivi sia per quanto concerne gli interventi di nuova costruzione che di riqualificazione. Anche se di natura differente, tutte queste tecniche sono accomunate dall'esigenza di avere, come dicevano i costruttori di case in terra cruda, "un buon cappello e un buon paio di stivali". Ciò significa che è fondamentale proteggere la paglia dall'acqua meteorica e dall'umidità del terreno attraverso una copertura sporgente e fondazioni sollevate dal piano di campagna.

Di seguito si descrivono i principali sistemi tecnologici, distinti in base al ruolo che la paglia assolve come materiale da costruzione e al campo di applicazione.

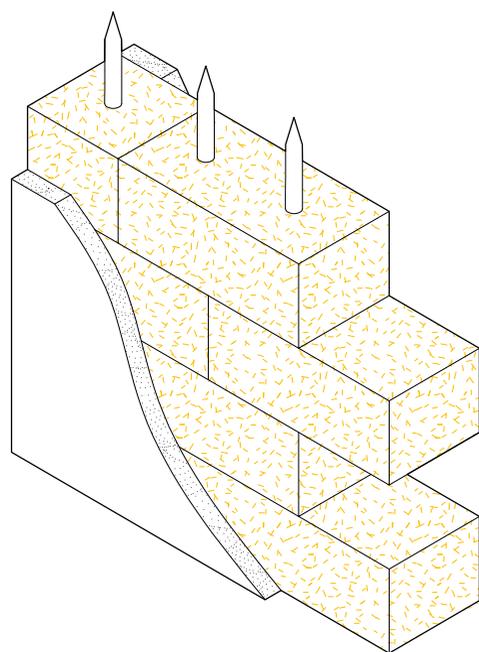


Fig. 54 Sistema a balle di paglia portanti

Sistema a balle di paglia portanti

Si tratta del metodo più antico, sperimentato dai coloni nel Nebraska in seguito all'invenzione della macchina imballatrice. Oggi, è il metodo più comune in Irlanda e Gran Bretagna.

In questo sistema costruttivo, conosciuto come *metodo Nebraska* o *Load bearing*, la paglia funge sia da elemento strutturale che da isolante termico. Le balle di paglia sono utilizzate come fossero grandi mattoni: posizionate le une sulle altre a giunti sfalsati, sono tenute insieme da sottili elementi verticali.

La maggiore problematica di questo metodo costruttivo riguarda il rapporto tra il peso della copertura e le aperture nella struttura muraria: *«Il peso del tetto causerà la compressione delle balle e più grande è il peso, più grande sarà la compressione. Con balle molto dense e compatte e carichi ordinari, la compressione può essere minima; anche in queste condizioni, però, il tipo di tetto e i vani di porte e finestre possono far sì che il peso si concentri in certe aree e causare di conseguenza problemi. [...] In realtà, le diverse configurazioni del tetto e i vani rappresentati da porte e finestre creano un carico diseguale sui muri, il che spesso avrà come risultato una compressione diseguale sugli stessi. I problemi conseguenti saranno piccoli o grandi a seconda delle variazioni del carico e della densità delle balle, nonché a seconda del disegno di tetto, porte e finestre. Ad esempio, quando tra uno spazio e l'altro occupato da porte o finestre si lascia una porzione ristretta di muro simile a una sorta di colonna (però formata da balle), queste colonne saranno soggette a un carico molto maggiore rispetto al resto del muro. Ciò è particolarmente vero quando vengono utilizzate delle architravi perché queste ultime non fanno che spostare il peso dal vano di porte e finestre caricandolo sulle colonne formate da balle poste sui lati dei vani di porte e finestre. [...] Le colonne di balle portanti piccole e isolate o i muri molto brevi, senza angoli o intersezioni con altri muri, dovrebbero essere evitati o utilizzati con somma cautela per ragioni simili a quelle appena indicate. [...] Strutture più piccole e più semplici, con meno finestre o finestre pic-*

cole, naturalmente danno meno problemi. Le potenziali differenze nella distribuzione del peso crescono col crescere della lunghezza del muro e con l'aumento delle dimensioni del tetto. [...] Alcuni costruttori ritengono che i muri in balle portanti sono più appropriati per essere utilizzati per edifici sotto i 120 m²»⁷¹.

Questo metodo costruttivo non può essere applicato sul territorio italiano perché le *Norme Tecniche per le Costruzioni*, in vigore dal 2008, non prevedono la paglia fra i materiali a finalità strutturale.

Tra i vantaggi del metodo Nebraska troviamo:

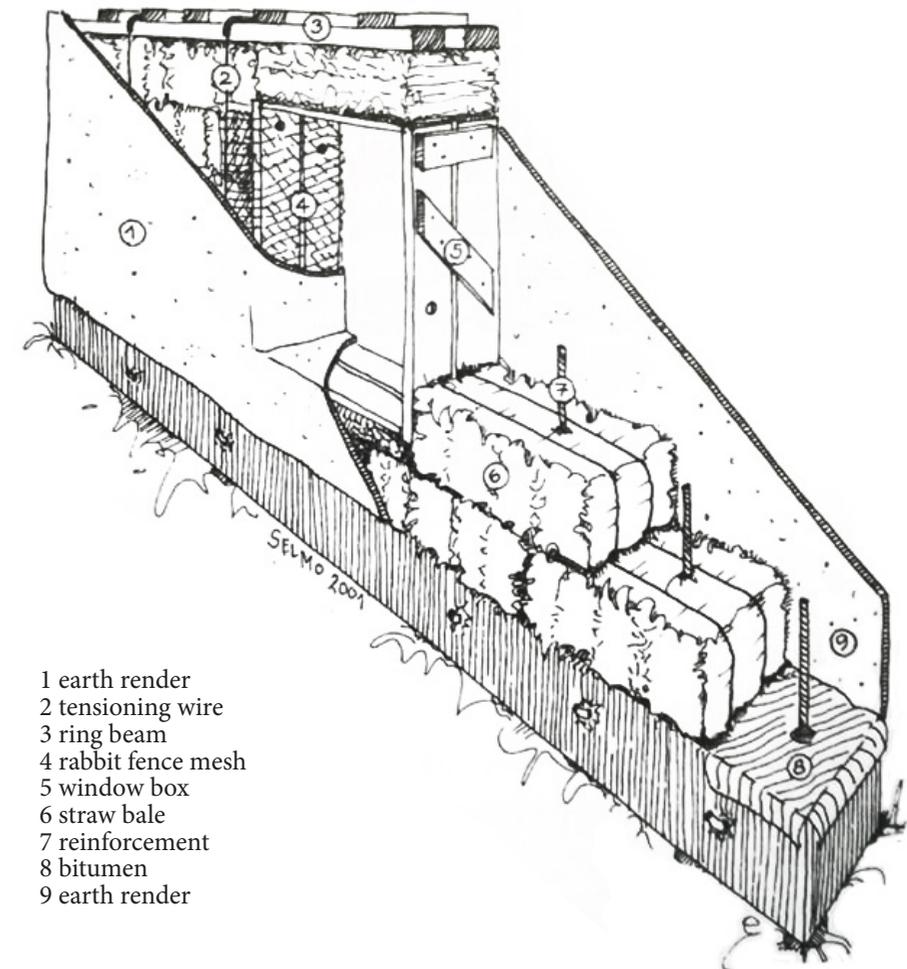
- è un metodo di costruzione semplice, veloce, diretto e accessibile, ideale per autocostruttori;
- facile progettazione per i non esperti, seguendo principi di base ben comprensibili;
- grande versatilità nella forma del progetto per cui è facile realizzare forme curve o circolari;
- prevede il minimo impiego di legname;
- distribuzione uniforme dei carichi;
- una riduzione dei ponti termici causata dall'assenza di una struttura portante realizzata con un materiale diverso dalla paglia.

Oltre ai vantaggi, è necessario ricordare alcuni limiti di questo sistema costruttivo:

- la paglia deve essere tenuta asciutta durante l'intero processo di costruzione fino alla stesura dell'intonaco. Questo può essere abbastanza difficile se si tratta di un edificio grande o di uno da costruire lentamente;
- in tutti i muri le aperture per le finestre e le porte non devono superare il 50% della superficie a muro;
- è necessario evitare l'impiego di coperture molto pesanti;
- bisogna utilizzare balle con elevata densità (almeno 90 kg/m³ ma l'ideale sarebbe 120-150 kg/m³);
- è necessario contenere le dimensioni e l'altezza del fabbricato (si deve rispettare un rapporto massimo di 5:1 tra altezza e spessore del muro);

⁷¹ Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

- è necessario aspettare un periodo di tempo abbastanza lungo (dalle tre alle dieci settimane) prima che le balle si comprimano del tutto sotto il peso della copertura.



- 1 earth render
- 2 tensioning wire
- 3 ring beam
- 4 rabbit fence mesh
- 5 window box
- 6 straw bale
- 7 reinforcement
- 8 bitumen
- 9 earth render

Fig. 55 Sistema Nebraska o Load bearing.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

Parete verticale

Quando si procede con l'elevazione del muro, lo sfalsamento dei giunti, ovvero «la distanza in orizzontale tra il termine della balla e quello della sottostante»⁷² non dovrebbe essere minore di 30 cm. Per collegare tra loro le balle in modo da rendere più stabile il muro, nella maggior parte dei casi si usano dei tondini di acciaio: il primo corso di balle è fissato a tondini annegati nelle fondazioni (se sono in calcestruzzo), mentre i corsi successivi sono fissati ai sottostanti con due tondini per ogni balla (Fig. 56). Altrimenti si possono impiegare elementi verticali in legno o bambù oppure le balle possono essere cucite con spaghi in plastica o fil di ferro a due a due, ma questo metodo risulta il meno stabile tra quelli elencati.

Possono essere impiegate balle di paglia di tutte le dimensioni, anche se le balle piccole (35x50x50-120 cm) risultano le più adatte poiché forniscono già un ottimo livello di isolamento e sono facili da trasportare e posizionare. Si preferisce posare le balle di piatto (spessore 50 cm) ma possono essere anche posizionate di coltello (spessore 35 cm) in base alle dimensioni dell'edificio che si sta realizzando.

Cordolo superiore

Quando il muro è terminato, vi si poggia in cima un cordolo in legno che serve a distribuire il peso della copertura su tutta la larghezza dei muri. I cordoli sono solitamente in legno e ricordano la forma di una scala, per questa ragione sono anche conosciuti come “cordoli a scala” o “cordoli scalettati”. Sono composti da due assi (solitamente 5x15 cm) parallele connesse tra loro trasversalmente da traversine della stessa dimensione (Fig.57). In alternativa si possono utilizzare dei cordoli scatolari in legno: sono costituiti da due assi parallele (solitamente 5x20 cm) messe sui bordi della parete e fissate sia superiormente che

⁷² Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

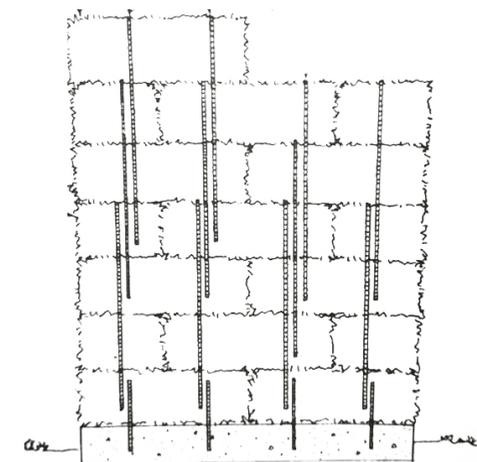


Fig. 56 Modalità di fissaggio delle balle di paglia nel metodo Nebraska o Load bearing. Fonte: Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

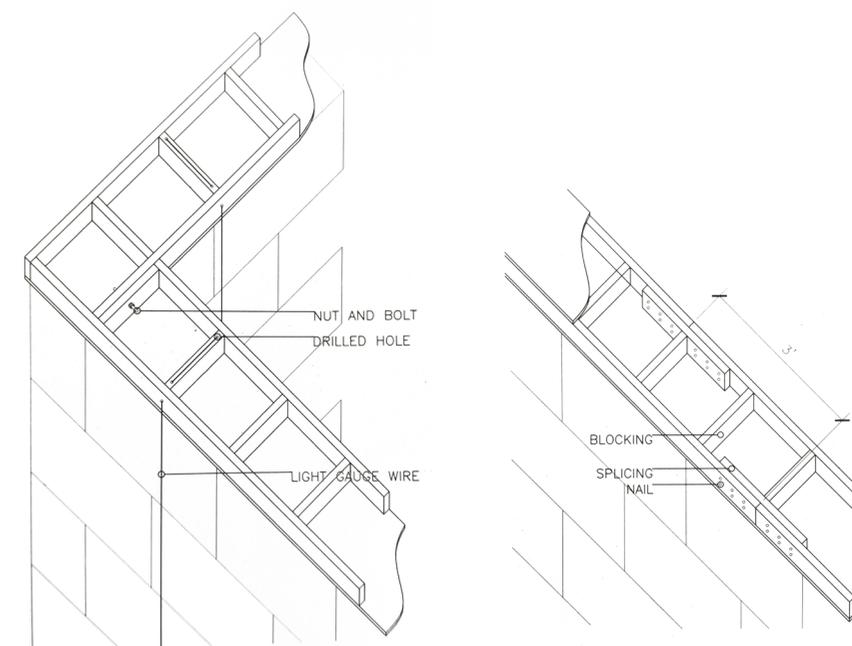


Fig. 57 Cordolo a scala. Fonte: Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.: New society, 2001.

inferiormente da pannelli in legno lamellare (Fig.58). Questa soluzione risulta più idonea a distribuire in modo bilanciato il peso del tetto sulla parete verticale. Molto poco diffuso è l'impiego di cordoli in calcestruzzo (Fig. 59) anche se può risultare utile in situazioni in cui, a causa della cattiva qualità delle balle, l'ultimo corso si presenta molto irregolare.

Compressione e ancoraggio

Nel sistema a balle di paglia portanti è fondamentale collegare in maniera idonea le fondazioni e il cordolo posto alla base del tetto poiché gli elementi di collegamento permettono alla copertura (o al solaio se l'edificio è composto da più di un livello) di resistere alle spinte del vento e alle scosse sismiche. Inoltre, questo collegamento ha la funzione di velocizzare la compressione delle balle sotto il peso del tetto, permettendo la stesura dell'intonaco in tempi più brevi.

Esistono vari metodi per collegare le balle di paglia al cordolo di fondazione. Il primo consiste nel fissare alle fondazioni delle barre filettate, farle passare attraverso le balle di paglia e, infine, farle proseguire oltre il muro per poterle fissare alla copertura (Fig.61). Le barre vengono connesse una all'altra (di solito si usano tratti da 90 cm) man mano che si procede alla costruzione del muro e per farlo si utilizzano dei dadi di prolungamento. In sostituzione si possono impiegare funi metalliche, cavi di acciaio o cinghie di poliestere che vengono fatti passare sui lati delle balle fino a sormontare il cordolo del tetto e vengono fissati alle fondazioni sui due lati del muro (Fig. 62). Si possono usare anche piccoli listelli di legno, poggiati in verticale a filo con la parete interna ed esterna del muro e collegati al tetto e alle fondazioni con un nastro metallico. Inoltre, ogni listello è collegato al corrispondente dalla parte opposta della parete tramite fili metallici fatti passare attraverso le balle.

La scelta del sistema di fissaggio è fondamentale perché richiede la presenza o meno di elementi di fissaggio inseriti nelle fondazioni.

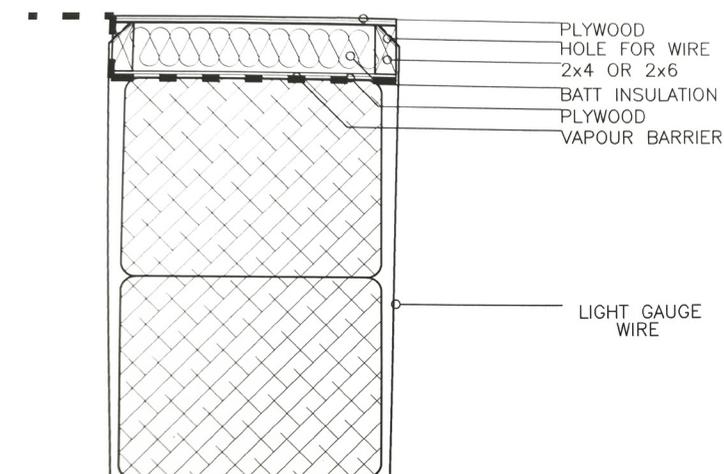


Fig. 58 Cordolo in legno.

Fonte: Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.:New society, 2001.

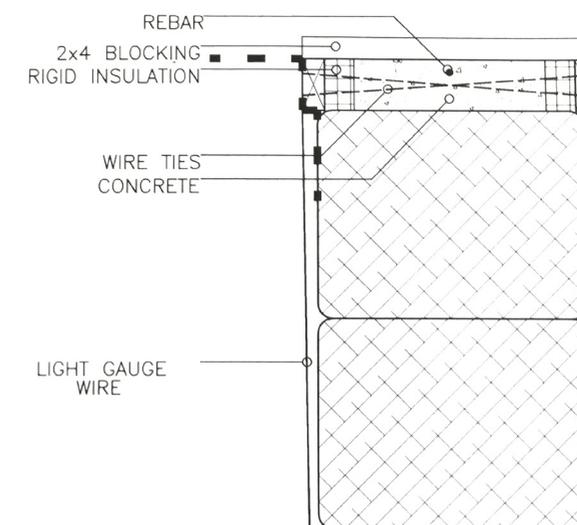


Fig. 59 Cordolo in calcestruzzo.

Fonte: Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.:New society, 2001.

Porte e finestre

Per quanto riguarda l'inserimento di porte e finestre in un edificio costruito con la tecnica portante, la principale preoccupazione riguarda i carichi del tetto: questi ultimi hanno un'influenza diretta su porte e finestre.

Di solito si impiega un architrave di acciaio (o in legno) a forma di scala che sormonta il controtelaio della porta o finestra (Fig.63). In questo caso il carico del tetto viene distribuito uniformemente sulle balle laterali quindi, queste balle, oltre ai normali carichi dovranno sostenere anche un carico aggiuntivo. La differenza di peso sopportato dalle balle può causare assestamenti differenziati tra le varie porzioni di muro, che a loro volta possono provocare lo spostamento della catena del tetto o la fessurazione dell'intonaco. L'unico modo per ridurre tale rischio è diminuire la dimensione delle aperture.

L'altra opzione consiste nell'inserire i telai di porte e finestre nei vani predisposti, dopo aver completato la parete. Oggi si utilizzano dei telai strutturali che trasferiscono i carichi sovrastanti direttamente alle balle sottostanti. Questi ultimi possiedono larghezza uguale allo spessore della parete e sono costituiti da un sistema di travi scatolari (Fig. 64, Fig.65). L'unico svantaggio di questo sistema consiste nel fatto che bisogna adattare il solaio alla parete già costruita riempiendo con della paglia sfusa gli spazi che si vengono a formare nei punti in cui il telaio non calza alla perfezione.



Fig. 60 Posizionamento di un cordolo a scala.

Fonte: MacDonald, S.O., Matta Myhrman e Diana S. Mindlin, *Edifique con fardos: una guía paso a paso para la construcción con fardos de paja*, Argentina: Nobuko Sa, 2004.

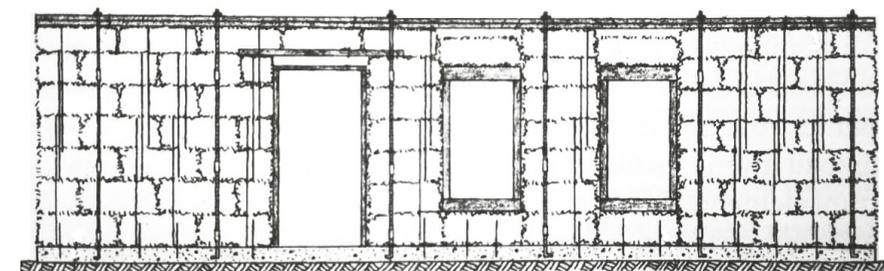


Fig. 61 Sezione di un muro pre-compresso con barre filettate.

Fonte: Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

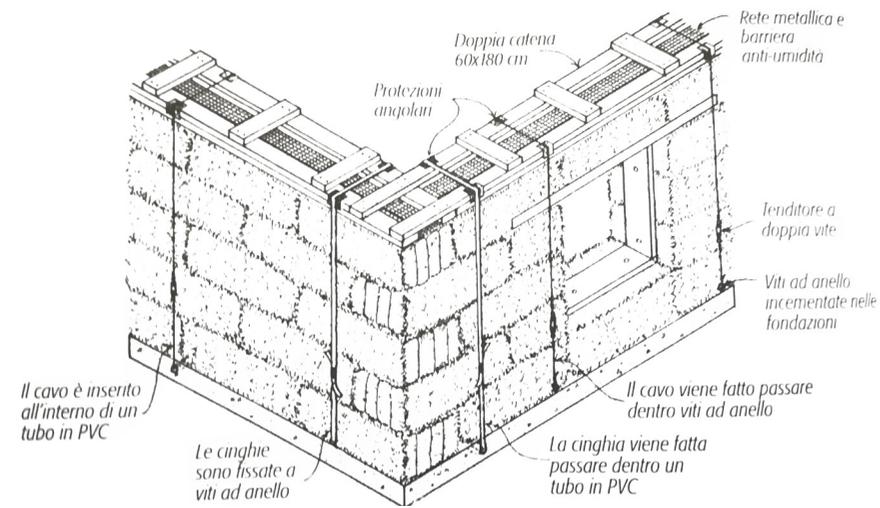


Fig. 62 Sezione di un muro pre-compresso con cavi e cinghie di poliestere.
 Fonte: Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

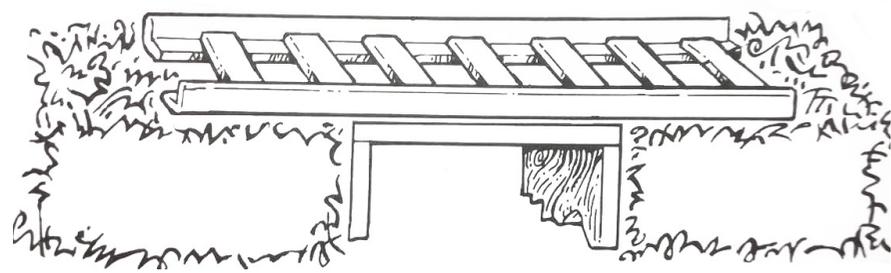


Fig. 63 Architrave in legno.
 Fonte: Jones, Barbara, *Costruire con le balle di paglia: manuale pratico per la progettazione e la costruzione*, Firenze: Terra Nuova edizioni, 2014.

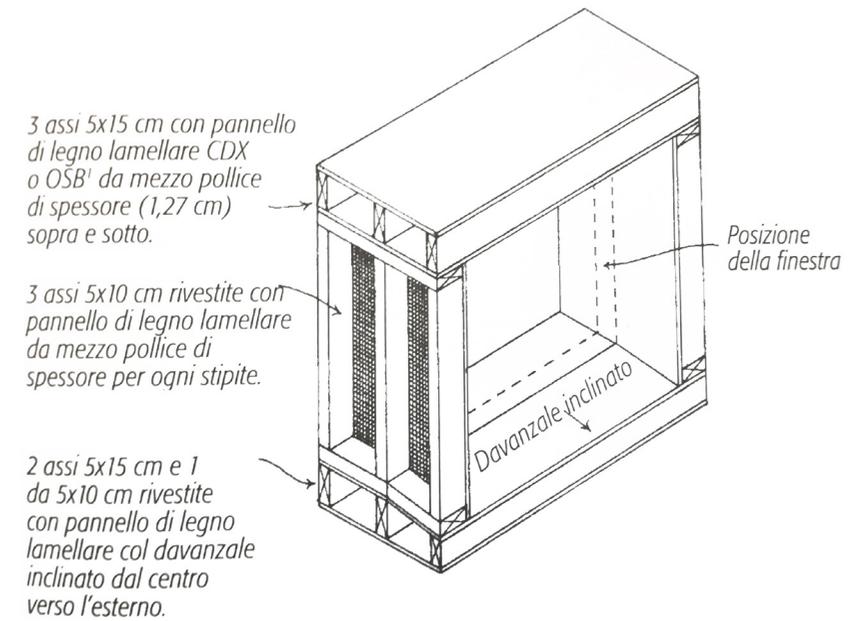


Fig. 64 Telaio strutturale.
 Fonte: Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

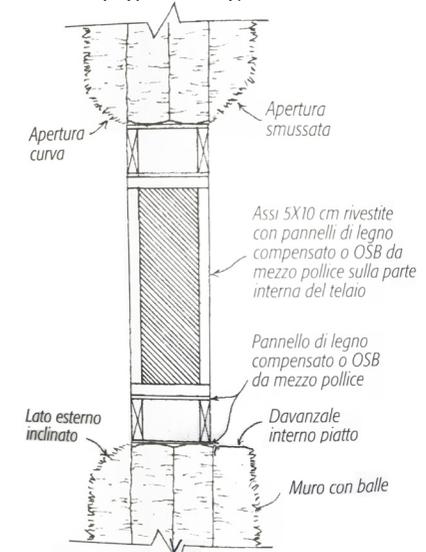
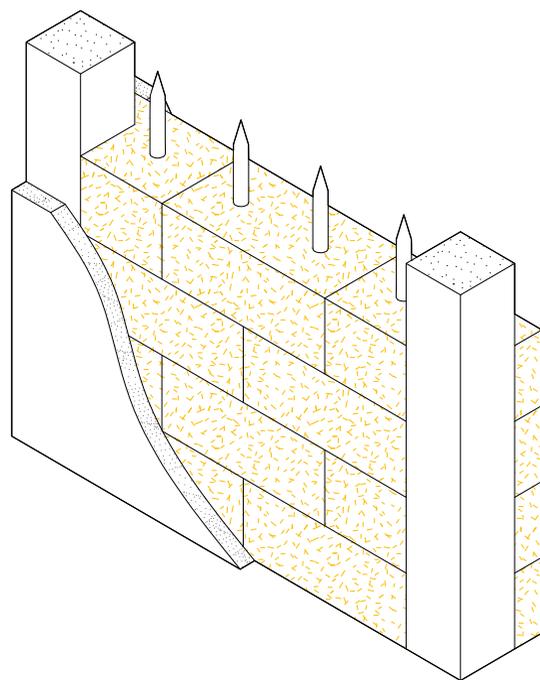
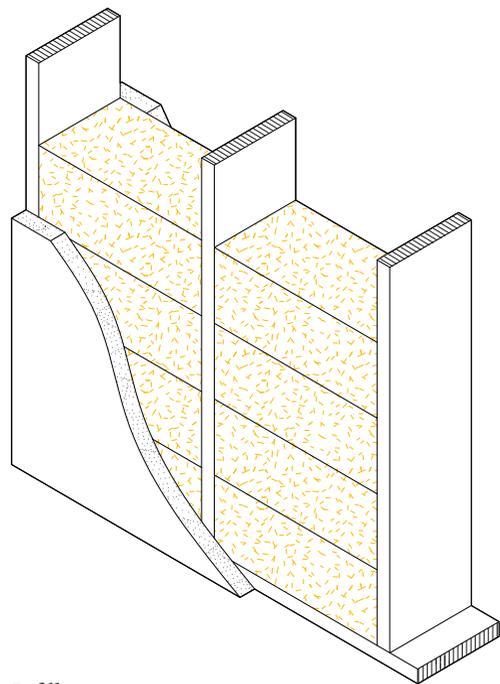


Fig. 65 Sezione di un telaio strutturale.
 Fonte: Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

Fig. 66 Sistema *Post and Beam*Fig. 67 Sistema *Infill*

Sistemi a balle di paglia non portanti

Si tratta del metodo attualmente più utilizzato perché non costituisce una novità per le normative edilizie essendo un metodo costruttivo ben consolidato.

In questo tipo di sistemi, una struttura solitamente in legno assolve il compito di trasferire i carichi. La paglia, invece, funge da tamponamento e da isolante termico ed è posizionata tra gli elementi verticali e orizzontali. Inoltre, dal momento in cui la paglia non ha funzione portante si utilizzano sempre balle piccole (35x50x50-120 cm).

Si distinguono due tipi di tecnologie costruttive, denominate rispettivamente: *Post and Beam* e *Infill*.

Di seguito sono elencati alcuni vantaggi del sistema a balle di paglia non portanti:

- maggiore familiarità da parte degli esperti del settore edile;
- la struttura non deve essere costruita in cantiere;
- è possibile ricavare un luogo coperto per lo stoccaggio dei materiali e per il posizionamento delle balle nelle pareti verticali subito dopo la realizzazione della copertura;
- è possibile impiegare balle meno dense (90-120 kg/m³) rispetto a quelle usate per il sistema a balle portanti;
- si può scegliere come posizionare le balle (di piatto o di coltello);
- non vi sono limitazioni per quanto riguarda la dimensione delle aperture;
- non bisogna prestare particolari attenzioni alle dimensioni del fabbricato;
- non è necessario precomprimere i muri né aspettare che i muri si comprimano sotto il peso del tetto, come per il metodo Nebraska.

Di seguito si elencano, invece, alcune criticità del suddetto sistema:

- è richiesta una carpenteria specializzata per la costruzione del telaio;
- prevede l'impiego di elevate quantità di legname;
- qualsiasi carico proveniente dal tetto viene assorbito dalla struttura portante, per cui l'architrave o il telaio della porta o finestra sostiene

solo il peso delle balle sovrastanti;

- disomogeneità nella superficie da intonacare che vede l'alternarsi di balle di paglia e struttura lignea.

Il sistema Post and Beam

È caratterizzato dalla presenza di una struttura composta da travi e pilastri. Le dimensioni degli spazi tra gli elementi strutturali sono guidate dalle dimensioni delle balle di paglia e i pilastri possono essere posizionati in modi diversi: all'interno del tamponamento in paglia in modo da fungere anche da controvento (Fig. 68, Fig.69) o possono essere posti in modo da non interferire con il tamponamento (Fig. 71, Fig. 72). In ogni caso le balle di paglia dovranno essere legate alla struttura portante. Inoltre, il posizionamento della struttura deve essere considerato già in fase di progettazione poiché incide sulle dimensioni dell'edificio: se la struttura è posizionata tra le balle la griglia strutturale dovrà essere basata sulla lunghezza della balla mentre, se la struttura è posizionata indipendentemente dalle balle, la lunghezza della balla non incide sulla griglia strutturale e dovrà essere considerata solo per quanto riguarda i vani di porte e finestre.

In questo metodo i telai di porte e finestre vengono fissati alla struttura in legno prima di procedere con il tamponamento in paglia.

Il sistema Infill

In questo sistema, invece, la struttura è formata da montanti verticali in legno posizionati a distanza ravvicinata, proprio come nel sistema *platform frame*. Si tratta di una variante del sistema *Post and Beam*: differisce da esso, oltre che per le dimensioni e le proporzioni degli elementi portanti, per i vani di porte e finestre in quanto nel presente sistema sono costruiti come supporti strutturali e distribuiti lungo il perimetro dell'edificio.

La struttura in legno può essere formata da elementi pieni (Fig.73), elementi a traliccio (Fig. 74), elementi ad H (Fig.75) o elementi scapolari (Fig.76). La presenza di montanti sulla superficie interna della

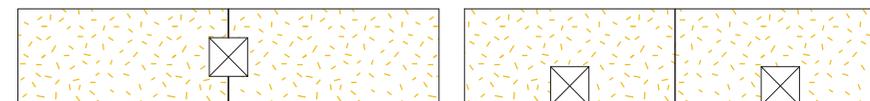


Fig. 68 Sistema *Post and Beam*: struttura portante interna al tamponamento.

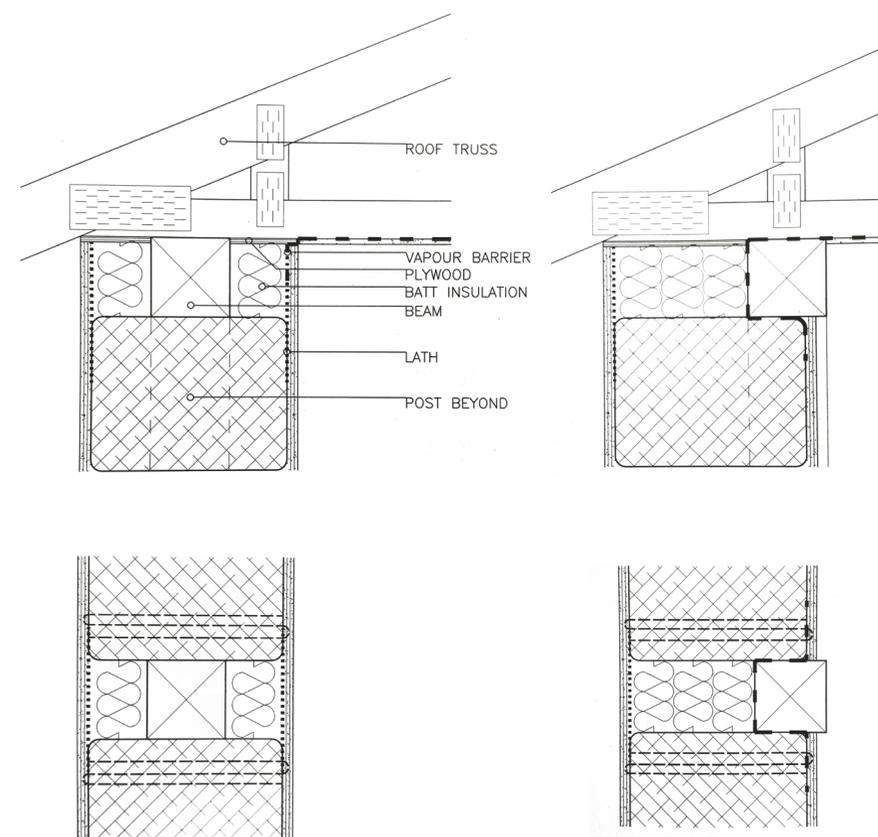
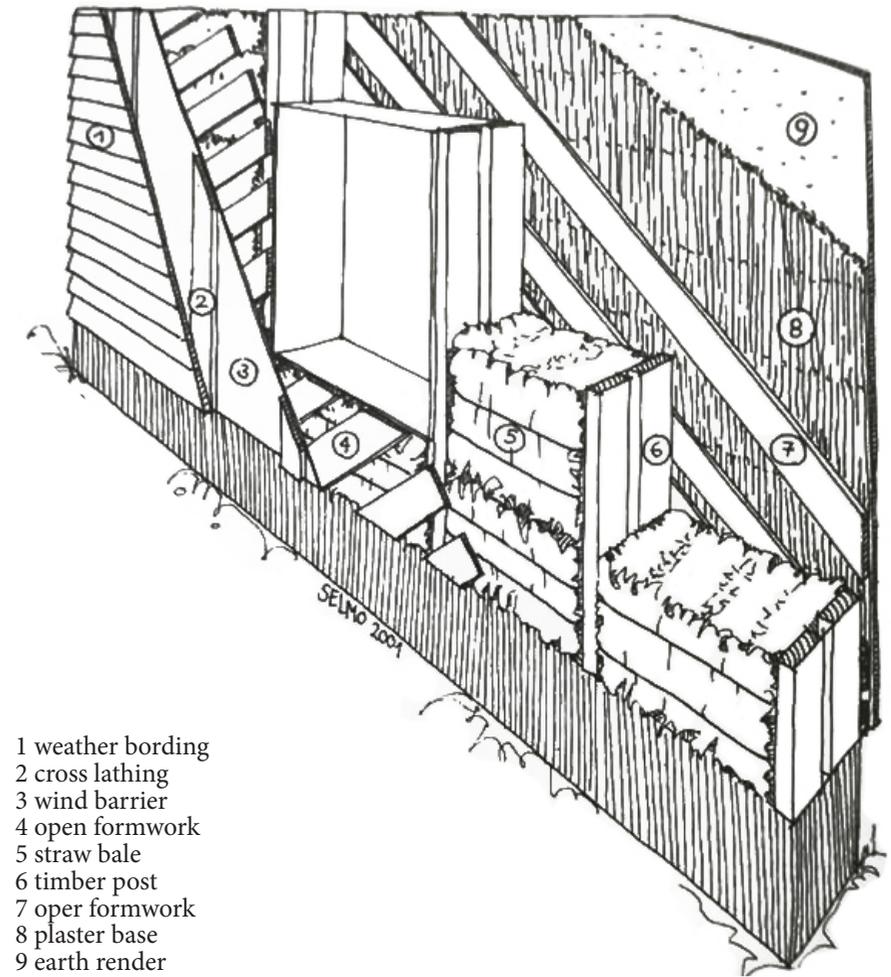


Fig. 69 Sistema *Post and Beam*: struttura portante interna al tamponamento. Piante e sezioni. Fonte: Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.:New society, 2001.

parete permette di fissare rivestimenti diversi (tavolati, lastre) ma allo stesso tempo, costituisce un elemento di discontinuità per la stesura dell'intonaco che si risolve applicando una rete portaintonaco prima della stesura dello stesso.

Tra le varie strutture il profilo scatolare risulta essere il più complesso: ogni elemento è composto da listelli (10x5 cm) posti ai lati e al centro, chiusi da lastre di compensato e riempiti con paglia sfusa o altri materiali isolanti per eliminare l'effetto del ponte termico. Inoltre, differisce dalle altre tipologie di strutture (a traliccio, ad H e ad elementi pieni) perché gli elementi vengono posizionati solo in corrispondenza delle aperture e degli angoli.



- 1 weather boarding
- 2 cross lathing
- 3 wind barrier
- 4 open formwork
- 5 straw bale
- 6 timber post
- 7 oper formwork
- 8 plaster base
- 9 earth render

Fig. 70 Sistema Infill.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

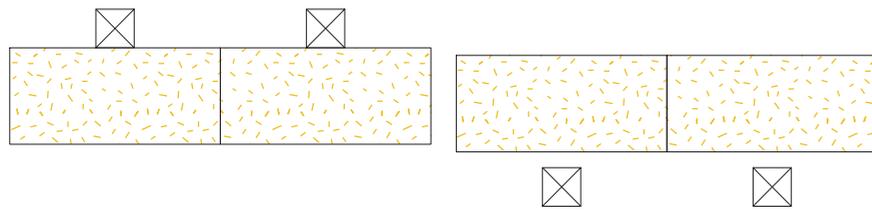


Fig. 71 Sistema *Post and Beam*: struttura portante esterna al tamponamento.

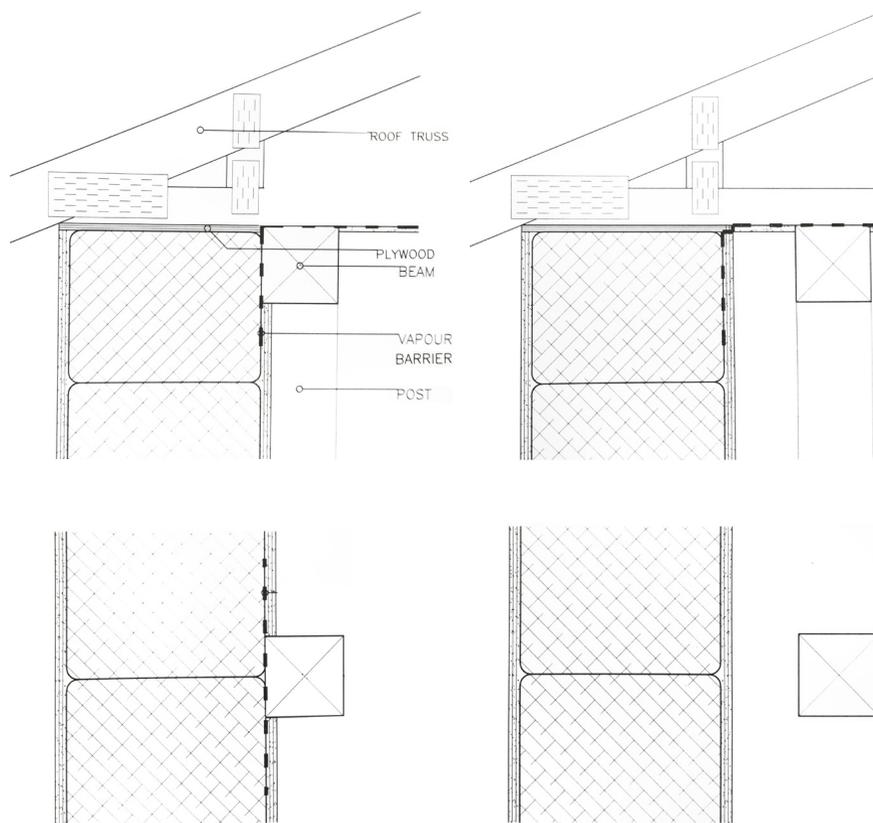


Fig. 72 Sistema *Post and Beam*: struttura portante esterna al tamponamento. Piante e sezioni.
Fonte: Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.:New society, 2001.

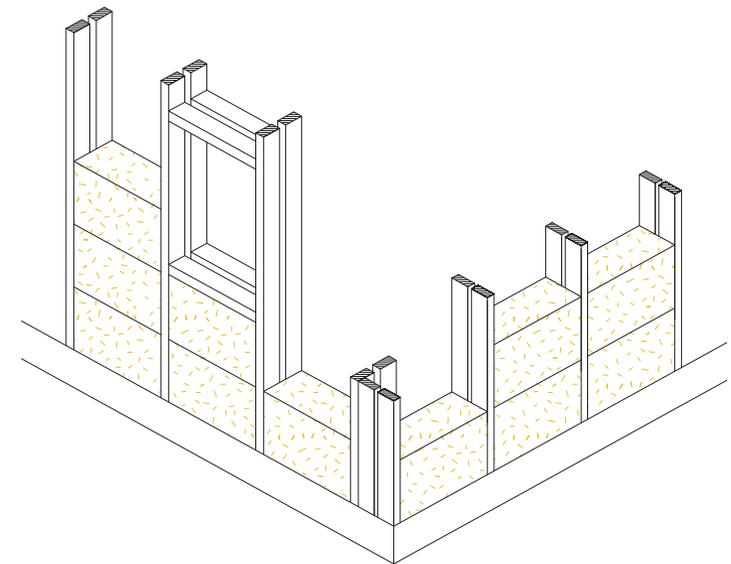


Fig. 73 Sistema *Infill*: struttura costituita da elementi pieni.
Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

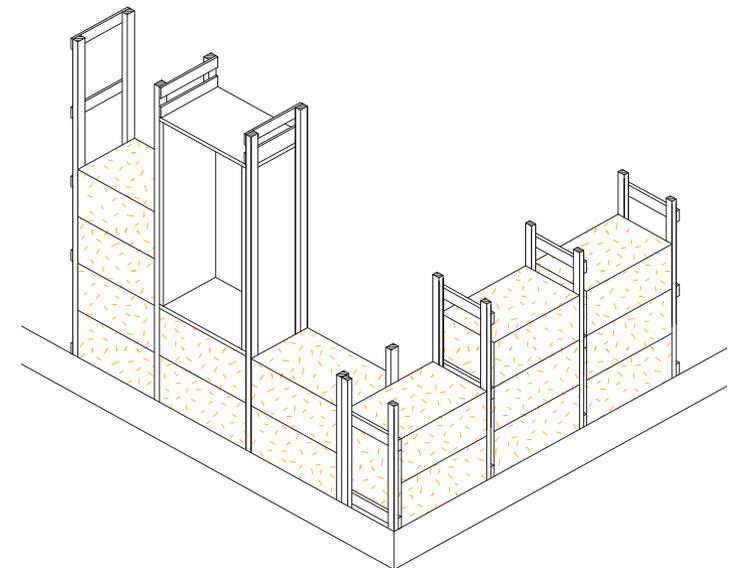


Fig. 74 Sistema *Infill*: struttura costituita da elementi a traliccio.
Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

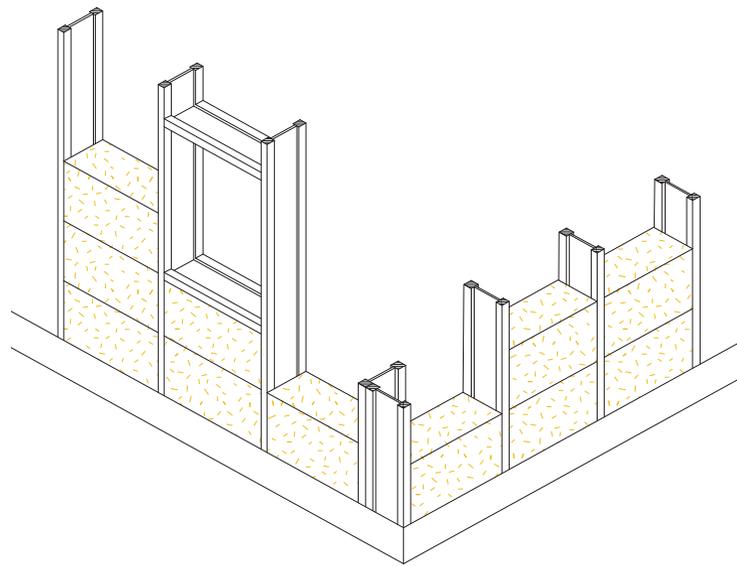


Fig. 75 Sistema *Infill*: struttura costituita da elementi ad H.
Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

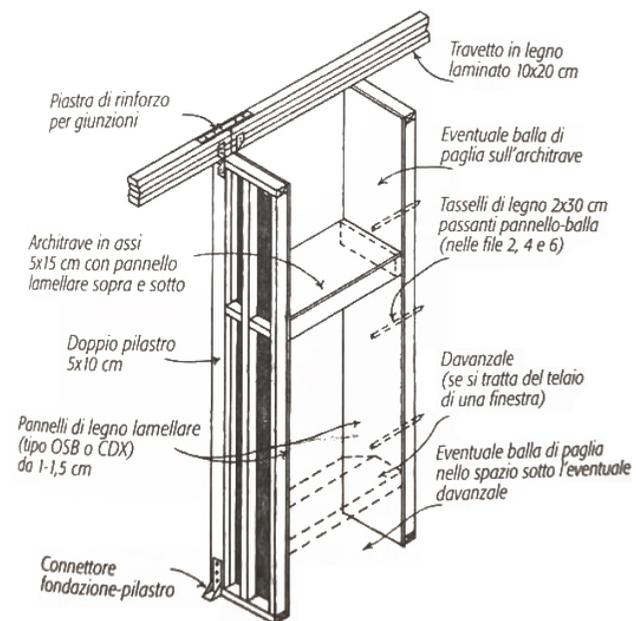


Fig. 76 Sistema *Infill*: struttura costituita da elementi scatolari.
Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

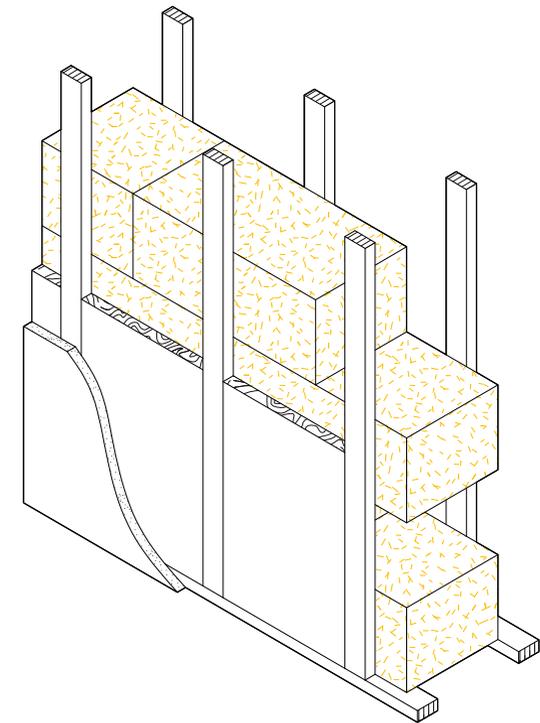


Fig. 77 Sistema *GREB*

Sistema GREB

Di origini recenti, la tecnica *GREB* nasce intorno agli anni '90 grazie al *Gruppo di Ricerca Tecnologica di La Baie* in Quebec, da cui prende il nome. Con questa tecnica, che può considerarsi “ibrida” perché vede l'integrazione di quattro elementi: paglia, legno, malta e giunti metallici, il gruppo di ricerca realizzò un intero ecovillaggio. A partire dal 2005, questa tecnica è stata maggiormente sviluppata dall'associazione francese *Approche-Paille*⁷³.

Nella tecnica *GREB*, le balle di paglia, posizionate di coltello, sono utilizzate come tamponamento e presuppongono sempre la presenza di una struttura a telaio in legno che le accoglie (Fig.78). Questo sistema costruttivo si caratterizza per la conformazione a “cassaforma” perché è composto da una doppia struttura di montanti in legno (di solito 4x10cm) posizionati sui bordi che saranno poi riempiti dalle balle di paglia. Inoltre, la struttura in legno richiede la presenza di una controventatura metallica, composta da bande in acciaio incrociate e fissate su entrambe le facce della parete (Fig.79). Quindi, dopo aver posizionato la struttura a telaio, si procede per livelli: si posiziona il primo strato di balle (una o due file), poi si fissano le casserature e si riempie lo spazio tra le balle di paglia e le casserature con la malta *GREB* (costituita da calce, sabbia, segatura ed una piccola parte di cemento se necessario) (Fig.80). La malta garantisce un perfetto isolamento e conferisce alla parete un aspetto liscio e uniforme.

Dopo dodici ore è possibile rimuovere le casserature e posizionare un altro paio di corsi di balle per procedere con il livello successivo. Quando la parete è terminata, si procede con la stesura dell'intonaco, solitamente in calce per il fronte esterno e in argilla per quello interno, allo scopo di garantire la traspirabilità dell'elemento murario.

Un'altra soluzione consiste nell'inserire maggiori quantità di cemento

⁷³ Associazione Francese fondata nel 2005 specializzata nella promozione e nello sviluppo delle costruzioni in paglia.

nell'impasto della malta. Questa soluzione conferisce alla malta maggiore rapidità di presa e resistenza meccanica (è un parametro importante dal momento in cui in questa tecnica costruttiva la malta contribuisce alla ripartizione dei carichi e alla controventatura).

Il cemento può essere sostituito dal gesso ma ne conseguono necessità e tempistiche di cantiere diverse.



Fig. 78 Sistema GREB: la struttura in legno.

Fonte: Radi, Valentina e Pietromaria Davoli, *A tutta paglia: soluzioni per una diversa visione del costruire e dell'abitare contemporaneo*, L'ufficio tecnico, p 10:23.



Fig. 79 Sistema GREB: la controventatura metallica.

Fonte: Radi, Valentina e Pietromaria Davoli, *A tutta paglia: soluzioni per una diversa visione del costruire e dell'abitare contemporaneo*, L'ufficio tecnico, p 10:23.



Fig. 80 Sistema GREB: il posizionamento delle casseformi e la colata di malta.

Fonte: Radi, Valentina e Pietromaria Davoli, *A tutta paglia: soluzioni per una diversa visione del costruire e dell'abitare contemporaneo*, L'ufficio tecnico, p 10:23.

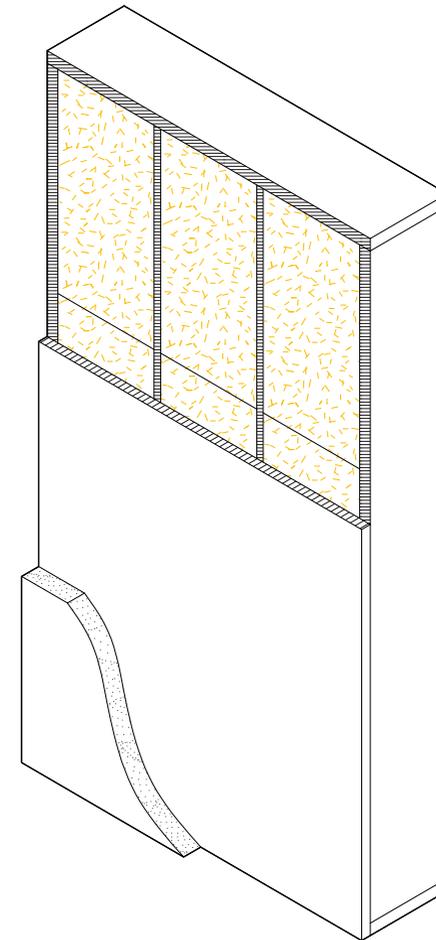


Fig. 81 Sistema a cassoni

Sistema a cassoni

I cassoni con riempimento in paglia sono generalmente impiegati nei sistemi prefabbricati e possono essere portanti oppure no. La maggior parte dei cassoni sono rivestiti, ma non è detto che questo rivestimento li renda portanti. La messa in opera di tali elementi dipende dalle specificità del cantiere: infatti possono essere posati vuoti, riempiti in parte o completamente riempiti. Le armature dei cassoni possono essere realizzate in vari materiali, ad esempio legno, travi reticolari e profilati a I. È però importante tener presente la variazione delle prestazioni termiche in base al materiale utilizzato per le armature.

Tra i vantaggi di questo sistema troviamo:

- la flessibilità poiché possono essere posati in cantiere in modo diverso, a seconda delle necessità e dei mezzi di sollevamento e trasporto disponibili.

- la possibilità di utilizzare dei sistemi di rivestimento a secco, evitando l'impiego di intonaci che necessitano di tempi lunghi asciugatura. Uno svantaggio, invece, riguarda i mezzi di sollevamento e di trasporto. Questi ultimi, a differenza dei sistemi visti finora, risultano essenziali ai fini della posa dei cassoni.

Oggi, si possono trovare in commercio varie aziende che producono elementi prefabbricati in paglia. Ad esempio il progetto *RISORSA*, nato dalla collaborazione tra *RiceHouse*⁷⁴ e *Novellocase*⁷⁵, che per primi in Italia hanno provveduto ad industrializzare il processo di fabbricazione di telai legno e paglia precompressa (Fig.82). Si ottiene un prodotto prefabbricato di altissima qualità, in grado di concorrere alla realizzazione di edifici ad elevata prestazione energetica rientrando negli standard passivi.

⁷⁴ Azienda con sede nel Biellese che commercializza prodotti per l'architettura realizzati con scarti provenienti dalla coltivazione del riso.

⁷⁵ Azienda nata nel 2017 realizza edifici in legno su misura con sede in provincia di Varese.

I pannelli in legno e paglia sono pensati per essere messi in opera secondo la tecnica del *Platform Frame* in cui ogni piano di un edificio funge da piattaforma per i piani superiori. Nello specifico: «Ogni telaio in legno e paglia è realizzato con montanti verticali in legno lamellare posti ad interasse. Sulle facciate interna ed esterna viene applicata una listellatura di abete obliquo che ne garantisce la staticità e le performance. L'applicazione viene realizzata attraverso un procedimento automatizzato di chiodatura in aderenza che ne garantisce la perfetta calibrazione. Le strutture orizzontali fungono da base di carico per l'applicazione del piano successivo. Le case di paglia costruite con la tecnica a telaio prefabbricato in legno e paglia sono generalmente posate su un sistema di fondazione a platea in cemento armato adeguatamente ancorato con sistema a radice di cordolo»⁷⁶.



Fig. 82 Pannelli prefabbricati in legno e paglia realizzati da *Novellocase*.
Fonte: <http://www.novellocasedipaglia.it/tecnologia/tecnica-costruttiva-telaio-in-legno-e-paglia>

⁷⁶ [novellocasedipaglia.it/tecnologia/tecnica-costruttiva-telaio-in-legno-e-paglia](http://www.novellocasedipaglia.it/tecnologia/tecnica-costruttiva-telaio-in-legno-e-paglia)

Le fondazioni

Tutte le suddette tecniche costruttive possono essere associate a vari tipi di fondazioni, che si descriveranno di seguito.

Innanzitutto, la scelta del tipo di fondazione dipende dalle caratteristiche dell'edificio che dovrà sorreggere e dalle condizioni locali: capacità portante del suolo, tipo di suolo, sismicità dell'area, etc.

In linea generale, per tutte le tipologie di fondazioni che si descriveranno di seguito valgono alcune considerazioni:

- devono essere abbastanza alte da proteggere la base della parete dall'umidità. Di solito vengono prolungate per almeno 15 cm oltre il terreno;
- è necessario assicurare un buon drenaggio;
- devono essere larghe quanto la parete sovrastante;
- è sempre utile fissare un tondino in modo che fuoriesca per almeno 30 cm per fissare il primo corso di balle;
- nel caso in cui ci si appresti a costruire un edificio in balle portanti, è necessario prevedere dei punti di attacco per collegare il cordolo del tetto alle fondazioni. Di solito si usano dei bulloni ad anello o dei tirafondi;
- è necessario impermeabilizzare la parte superficiale, cioè la parte a contatto con la base della parete con plastica, emulsioni bituminose, carta catramata o lamierini zincati.

Fondazioni in calcestruzzo

Sono le più utilizzate perché si tratta della soluzione più veloce e durevole. Il getto di calcestruzzo è rinforzato, di solito, con delle barre filettate in acciaio. In alternativa si possono usare tondini in vetroresina (più costosi) o bambù diviso a metà (non accettato dalla normativa statunitense). In passato, prima che il tondino diventasse un elemento di uso comune, si utilizzava filo spinato, vecchi tubi e qualsiasi pezzo di acciaio abbastanza lungo. Essendo il calcestruzzo un materiale

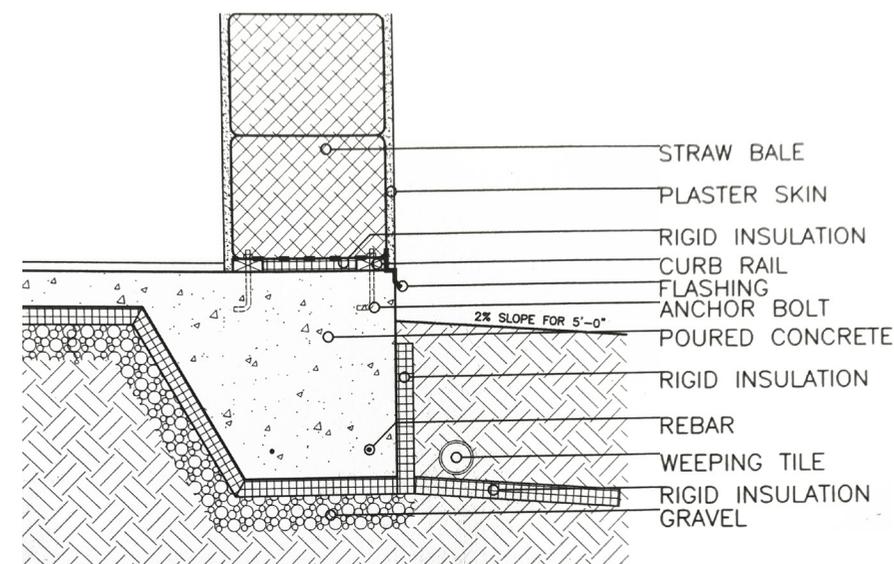


Fig. 83 Fondazioni in calcestruzzo.

Fonte: Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.:New society, 2001.

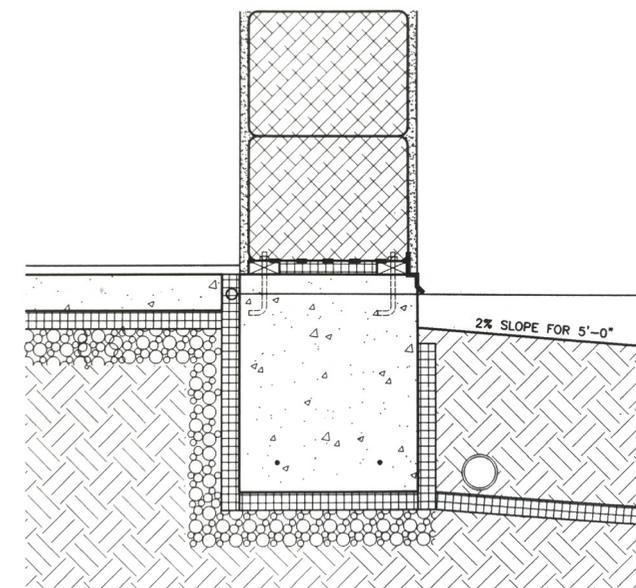


Fig. 84 Fondazioni in calcestruzzo.

Fonte: Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.:New society, 2001.

poco compatibile con la paglia, questa soluzione è da preferire solamente in caso di terreni a bassa portanza o in zone ad elevato rischio sismico (Fig.83, Fig.84).

Fondazioni a trincea

In questo tipo di fondazioni l'impiego del cemento è notevolmente ridotto, sono quindi più economiche e più sostenibili, ma allo stesso tempo hanno una portanza ridotta che le rende meno resistenti nei confronti del vento e non adatte a zone con elevato rischio sismico. Per prima cosa viene scavata una trincea, successivamente riempita con ciottoli di fiume o frammenti di pietrame compatto (Fig.85). In alternativa possono essere utilizzate un misto di ghiaia e sabbia per assicurare un buon drenaggio. Inoltre, per evitare accumuli di acqua sul fondo, la trincea viene realizzata con una pendenza minima inserendo sul fondo una tubazione bucherellata per portare via l'acqua in eccesso. Infine, le trincee devono essere larghe quanto la trave di fondazione, compreso uno strato isolante posto sul fronte esterno.

Fondazioni in pietra

Sono le fondazioni più utilizzate soprattutto in zone in cui il cemento è costoso o difficile da reperire anche se richiedono maggior lavoro rispetto alle fondazioni in cemento. Per prima cosa, si scava una trincea e vi si versano tra gli 8 e i 10 cm di calcestruzzo, poi si gettano nel cemento ancora fluido delle pietre e successivamente, si aggiungono cemento e pietre fino a raggiungere il termine della trincea.

Altri tipi di fondazioni

Meno impiegate sono le fondazioni a palafitta (utili quando ci si imbatte in un dislivello), le fondazioni in blocchetti di calcestruzzo o le fondazioni in materiali non convenzionali come gli pneumatici riempiti in terra o argilla (Fig.86).

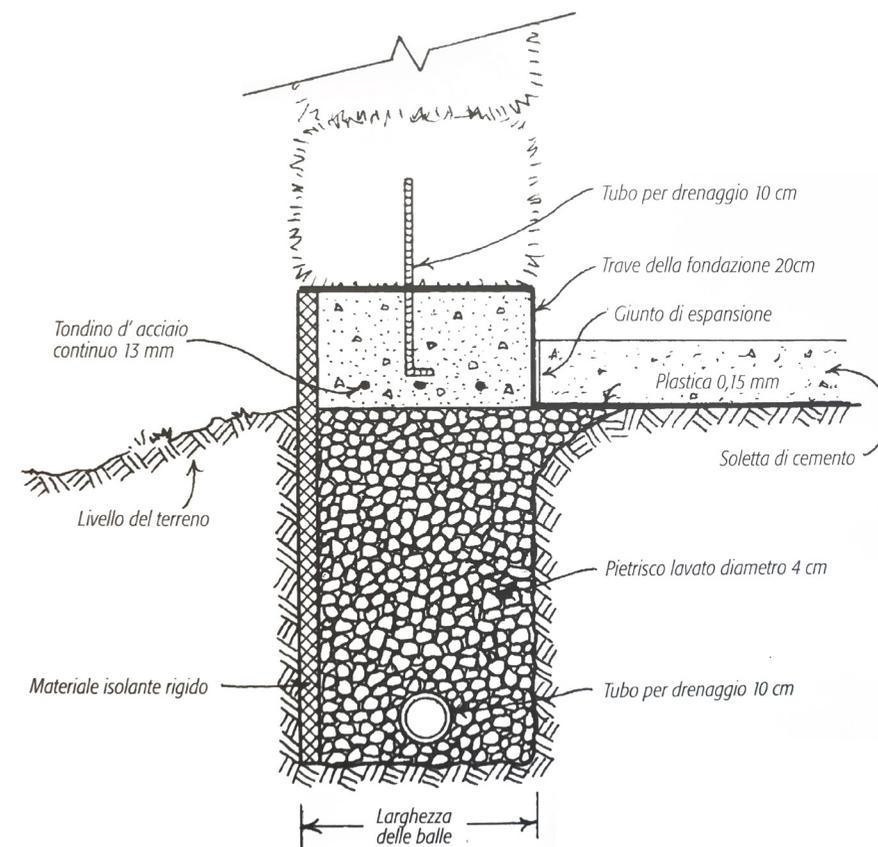


Fig. 85 Fondazioni a trincea.

Fonte: Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

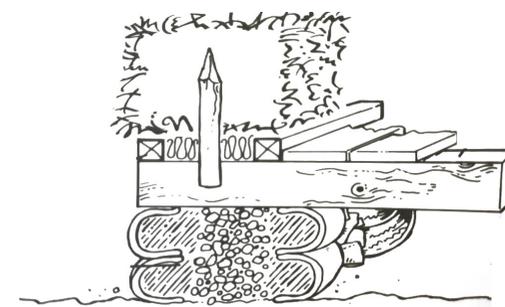


Fig. 86 Fondazioni con pneumatici.

Fonte: Jones, Barbara, *Costruire con le balle di paglia: manuale pratico per la progettazione e la costruzione*, Firenze: Terra Nuova edizioni, 2014.

Le coperture

In linea generale, per gli edifici in balle di paglia possono essere impiegati vari tipi di coperture anche se la tecnica costruttiva dell'edificio può influire sulla scelta del tipo di copertura. Gli edifici realizzati con tecniche costruttive a balle di paglia non portanti possono avere qualsiasi tipo di tetto. Invece, per quanto riguarda gli realizzati con la *tecnica Nebraska*, si preferisce la copertura a quattro falde perché il peso del tetto viene scaricato equamente su tutte e quattro le chiusure verticali.

Generalmente, le coperture più diffuse sono quelle realizzate con un'intelaiatura in legno o in acciaio (poco comune per gli edifici residenziali) anche se si sta diffondendo sempre più la copertura verde. La tipica copertura con struttura in legno consiste in una pannellatura e una barriera al vapore fissate alle travi sul lato inferiore per impedire alla paglia posizionata tra le travi di cadere (Fig. 88). Inoltre, se la pannellatura è formata da pannelli OSB si può evitare l'inserimento della barriera al vapore e, per migliorare il comportamento al fuoco della struttura si possono aggiungere lastre di cemento o cartongesso (Fig. 89). La soluzione tecnologica più complessa consiste nell'avere una struttura secondaria che sostiene solo il peso delle balle e una struttura primaria che resiste alle spinte del vento e sostiene i carichi da neve (Fig.90). La suddetta soluzione risulta vantaggiosa se le balle sono ventilate per eliminare i residui di umidità o la condensa che potrebbe svilupparsi.

La copertura verde può essere realizzata con metodi tradizionali posizionando le balle di paglia al di sopra della struttura portante (Fig.91) oppure, come sperimentato per la prima volta in Quebec, poggiando le balle di paglia sulla struttura del tetto fino a decomposizione per poi procedere con la semina di piante e fiori (Fig. 92).

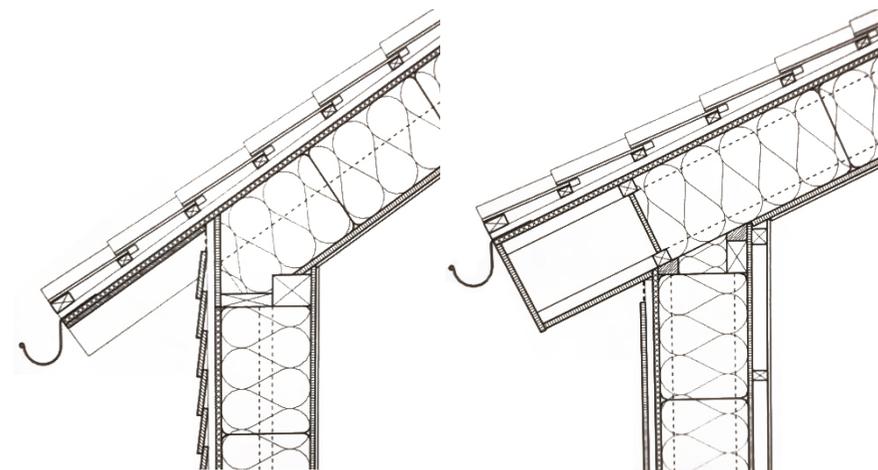


Fig. 87 Possibili nodi parete/copertura.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

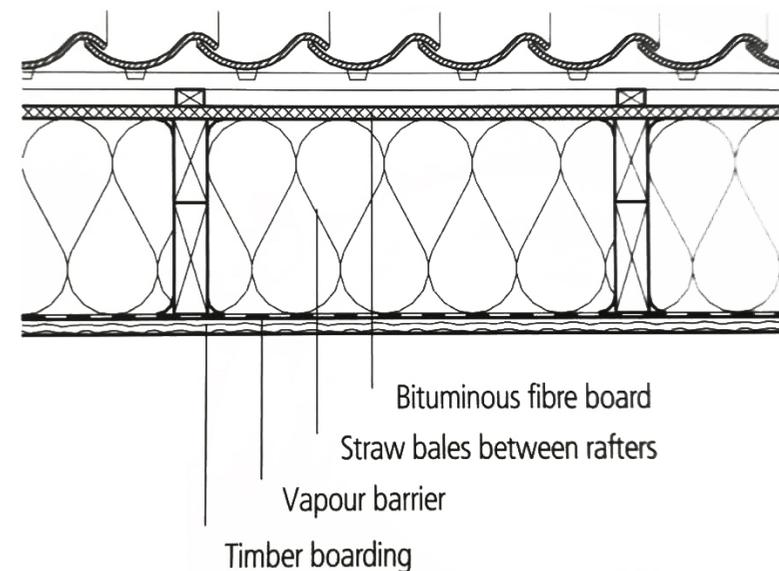


Fig. 88 Tipica copertura con struttura in legno.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

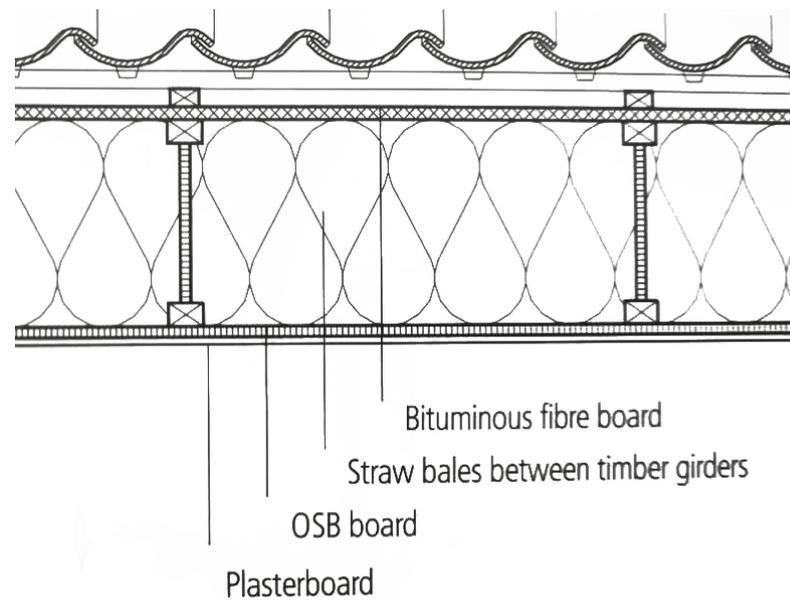


Fig. 89 Tipica copertura con struttura in legno.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkäuser, 2005.

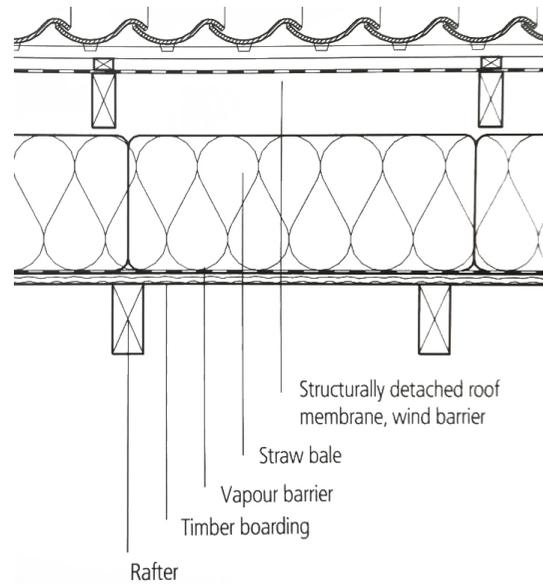


Fig. 90 Copertura con doppia struttura in legno.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkäuser, 2005.

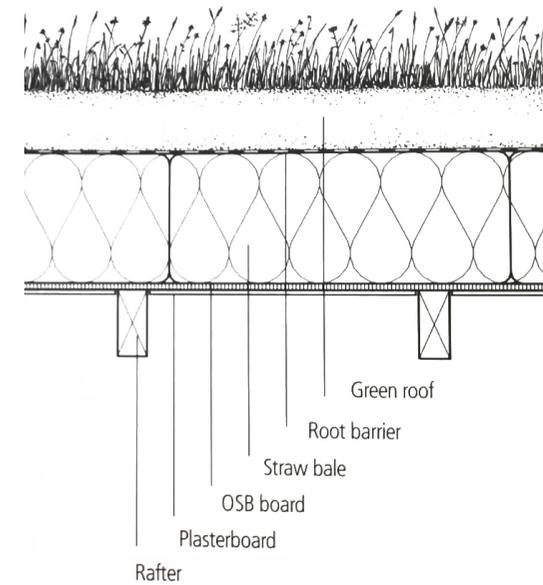


Fig. 91 Copertura verde con isolamento posizionato al di sopra della struttura portante in legno.

Fonte: Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkäuser, 2005.



Fig. 92 Copertura verde realizzata in Quebec.

Fonte: MacDonald, S.O., Matta Myhrman e Diana S. Mindlin, *Edifique con fardos: una guía paso a paso para la construcción con fardos de paja*, Argentina: Nobuko Sa, 2004.

Riqualificazione

Parallelamente al ramo delle nuove costruzioni però, sta progredendo anche la ricerca tecnologica per l'impiego della paglia sull'esistente. Per quanto riguarda gli interventi di riqualificazione la paglia viene impiegata nei cappotti termici, e questi ultimi possono essere posizionati sia all'intradosso che all'estradosso di pareti o coperture. In generale, per cappotti posizionati sul lato esterno delle chiusure verticali vengono aggiunte nuove fondazioni, e su queste si edifica il cappotto in balle di paglia che a sua volta viene fissato alla parete esistente. Mentre, i cappotti interni, dal momento in cui devono essere dotati di una struttura portante in legno, vengono utilizzati solitamente per ridurre il rischio sismico di edifici che non possiedono un'adeguata struttura portante. Quindi, negli interventi di riqualificazione la paglia non ha funzione strutturale, ma funge solamente da isolante termico. Di solito è necessario provvedere ad estendere la sporgenza della copertura che, dato il notevole spessore aggiunto (di solito 35 cm per balle posizionate di piatto o 50 cm per balle posizionate di coltello, più lo spessore del rivestimento), non riesce a garantire la protezione della nuova parete dagli agenti atmosferici.

Esistono principalmente due modi per realizzare un cappotto.

Il primo prevede che le balle di paglia siano inserite in un telaio in legno che è fissato, a sua volta, alla parete esistente tramite elementi metallici. Le balle possono essere sia inserite negli appositi spazi all'interno del telaio e tenute in posizione dalla forza di compressione che agisce su di esse, sia fissate alla parete esistente con funi, fascette in materiale plastico, cinghie metalliche, che vengono fatte passare all'interno di elementi di fissaggio metallici.

Per distaccare il primo corso di balle di paglia dal terreno, viene eretto un cordolo (solitamente in mattoni e riempito con materiale isolante sfuso o calcestruzzo), che funge anche da fondazione per il cappotto in paglia perché, per garantire maggiore solidità, viene prolungato per alcuni centimetri al di sotto del livello del terreno. Tra il cordolo

di fondazione e il primo corso di balle viene inserito un cordolo in legno, a sua volta tassellato al cordolo di fondazione, per permettere un migliore fissaggio dello strato isolante. Solitamente, questo cordolo è costituito da due assi in legno posizionate alla stessa distanza e raccordate in alcuni punti da piccole assi in legno, come si trattasse di una scala. Man mano che si prosegue con l'innalzamento del cappotto, degli elementi orizzontali in legno vengono fissati al telaio o alla struttura esistente per permettere la compressione delle balle sottostanti.

In questo caso, l'intonaco può essere applicato sia direttamente sulle balle di paglia (precedentemente rasate) che su uno strato di arelle di canne palustri fissato alle balle al fine di eliminare punti di discontinuità fra tamponamento ed elementi in legno.

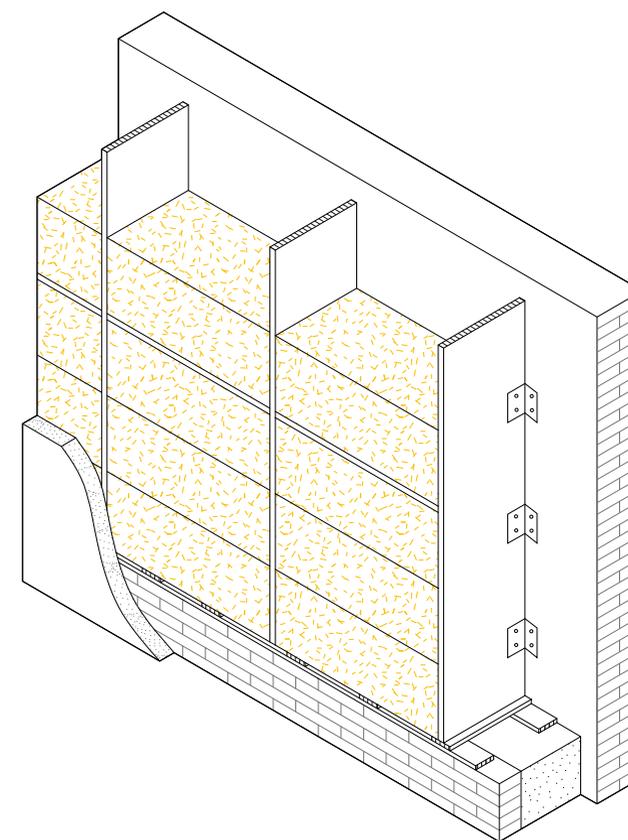


Fig. 93 Il metodo costruttivo per interventi di riqualificazione appena descritto.

Il secondo metodo prevede anch'esso la costruzione di un cordolo di fondazione, ma questa volta in calcestruzzo armato, sul quale vengono applicate le balle di paglia (posizionate a giunti sfalsati) collegate tra loro tramite elementi verticali e sottili in legno o in metallo. Anche in questo caso, il cordolo di fondazione viene prolungato per alcuni centimetri al di sotto del livello del terreno. Per garantire rigidezza al cappotto, è importante che il primo corso di balle (o anche il secondo se necessario) venga infilato nei tondini appositamente annegati nel cordolo di fondazione e che fuoriescono da essa di almeno 30 cm. Anche in questo caso viene impiegato un cordolo in legno, identico a quello descritto nella tecnica precedente, che permette un fissaggio migliore del primo corso di balle di paglia. Per il fissaggio dei corsi di balle superiori al terzo vengono impiegati dei picchetti in legno a sezione quadrata o circolare oppure sottili elementi metallici.

Alcune volte vengono fissati alla parete esistente degli elementi orizzontali lignei che servono, una volta che vengono raggiunti dal cappotto in balle di paglia, a comprimere le balle sottostanti attraverso l'ausilio di martinetti idraulici.

Infine, l'intonaco viene applicato direttamente sulla superficie delle balle o su una rete portaintonaco.

È importante sottolineare che i due tipi di fondazione descritti nei due metodi sono interscambiabili: si possono utilizzare sia per un cappotto dotato di struttura a telaio che per un cappotto ancorato alla parete esistente. Inoltre, non esistono delle vere e proprie regole per la costruzione di cappotti in paglia, quindi si possono operare delle varianti (come verrà mostrato nelle schede dei progetti presenti nel paragrafo successivo) in tutte le fasi del processo costruttivo.

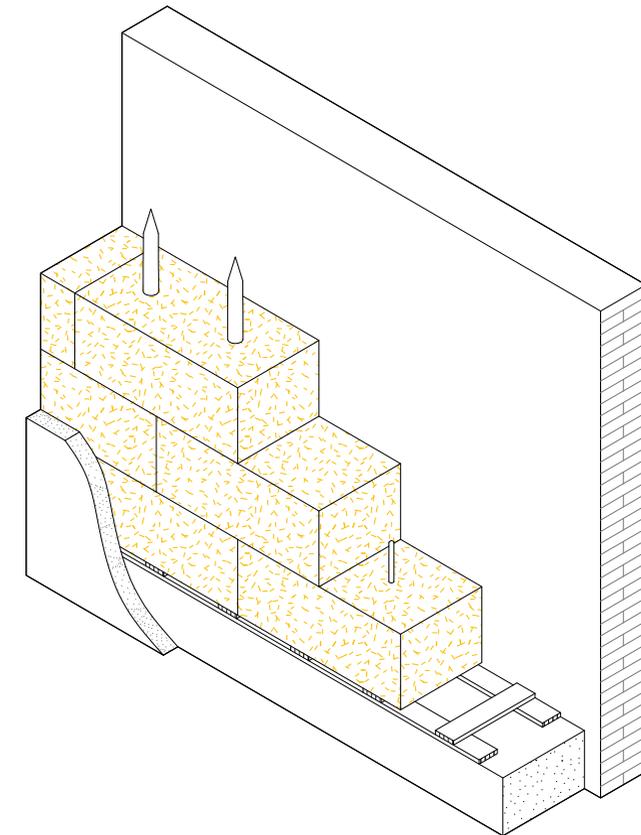


Fig. 94 Il metodo costruttivo per interventi di riqualificazione appena descritto.

Esperienze nel mondo



- 1 Butler's house, Bridport (GB)
- 2 Whitty's House, Alburbesque (NM)
- 3 Calkin's House, Alburbesque (NM)
- 4 Yannik Mollin House, Laval (FR)
- 5 Scuola materna e primaria "Montessori", Avignone (FR)
- 6 Wihan's house, Bražec (CZ)
- 7 House Simma, Hittisau (A)

Butler's house



Luogo: Bridport (GB)

Progettista/i: Jakub Wihan

Data origine costruzione: 1960

Anno realizzazione intervento: 2012

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a parete esistente

Contesto: suburbano

Realizzazione: autocostruzione e impresa di costruzione

L'edificio, risalente agli anni '60, si trova a Bridport, in Gran Bretagna. Il proprietario, John Butler, aveva partecipato a un corso di costruzione con balle di paglia tenuto dall'arch. Kuba Wihan e ne era rimasto molto affascinato, per cui decise di applicare un cappotto in paglia alla sua abitazione che necessitava di un intervento massiccio. Infatti, la copertura venne isolata con fiocchi di cellulosa, mentre per le chiusure verticali vennero impiegate le balle di paglia.

Inoltre, nell'ambito dello stesso intervento, venne costruita una stufa in muratura, inseriti pannelli solari, un'unità di trattamento dell'aria, un sistema per la raccolta delle acque meteoriche e, infine, è stato costruito in adiacenza un ampliamento realizzato interamente con balle di paglia.

I lavori sono stati realizzati in autocostruzione tramite dei workshop organizzati da *Amazonails*⁷⁷.

⁷⁷ Associazione inglese che organizza corsi di autocostruzione di edifici in paglia, presieduta da Barbara Jones.



Butler's house

Fonte: houseplanninghelp.com



Butler's house durante i lavori di riqualificazione

Fonte: houseplanninghelp.com



L'edificio esistente possiede già un elemento positivo: il tetto molto sporgente che permette di proteggere meglio la parete dall'acqua.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Fondazioni del cappotto rivestite con geotessile per impedire al terreno argilloso di penetrare e mescolarsi con la ghiaia.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Fondazioni riempite con ghiaia compattata infine coperta da uno strato di argilla.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Muro di mattoni per sollevare le balle dal terreno al fine di evitare il contatto con l'umidità del terreno e con gli schizzi d'acqua piovana.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Le nuove fondazioni collegate alla parete esistente tramite fascette in acciaio.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Vetro cellulare riempie il vuoto tra le nuove fondazioni e la parete esistente.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Intonaco in argilla applicato alla parete esistente per evitare l'infiltrarsi di insetti e roditori tra gli spazi vuoti.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Basetta di legno riempita con argilla espansa e fissata alla fondazione.
Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Telai in legno (abete di Douglas) ancorati alla parete esistente nei pressi delle aperture per permettere, successivamente, il fissaggio delle finestre.

Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Balle di paglia tagliate a metà (spessore circa 22,5 cm) posate e legate alla parete attraverso delle fascette in polipropilene fatte passare attraverso degli occhielli metallici, a loro volta ancorati alla parete esistente.

Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Penultimo corso di balle compresso con martinetti idraulici e piastra d'acciaio per adattare l'ultimo corso di balle.

Fonte: thewoodlouse.blogspot.com



Intonaco in calce e vetro riciclato posato su una rete di juta.

Fonte: thewoodlouse.blogspot.com

Whitty's house



Luogo: Alburbesque (NM)

Progettista/i: Cadmon Whitty

Data origine costruzione: 1948

Anno realizzazione intervento: 2000

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a parete esistente

Contesto: rurale

Realizzazione: autocostruzione e impresa di costruzione

La casa si trova in una zona suburbana ad Alburbesque, in New Mexico.

Al momento dell'acquisto l'edificio (risalente al 1948) si presentava vecchio e poco efficiente, le pareti andavano isolate e lo stucco andava riparato. Così il proprietario nonché fondatore della compagnia specializzata in costruzioni con balle di paglia *Paja Construction*⁷⁸, Cadmon Whitty⁷⁹, decise di intervenire per renderla più efficiente. L'edificio esistente è caratterizzato da una struttura leggera in legno. L'intervento di riqualificazione interessa solamente le chiusure verticali opache e il tetto: si rese necessario un prolungamento della falda per proteggere l'isolamento in paglia delle pareti.

⁷⁸ Fondata nel 1991 e specializzata in costruzioni in paglia e altri metodi costruttivi green.

⁷⁹ Autore delle prime Linee guida sulle costruzioni in paglia del New Mexico, successivamente incorporate nel codice di costruzione del New Mexico.



Whitty's house

Fonte: pajaconstruction.com



Whitty's house durante i lavori di riqualificazione

Fonte: pajaconstruction.com



Fondazione costituita da un cordolo in calcestruzzo, realizzata tutt'intorno al perimetro dell'abitazione.

Fonte: pajaconstruction.com



Strato di materiale isolante rigido (spessore di 5 cm) posizionato tra il basamento e il primo corso di balle di paglia. Lo spessore del cappotto esterno è di 35 cm.

Fonte: pajaconstruction.com



Balle fissate alla struttura della casa tramite delle cinghie metalliche.

Fonte: pajaconstruction.com



Struttura lignea posizionata per ospitare i nuovi serramenti.

Fonte: pajaconstruction.com



Prolungamento della copertura esistente per garantire una maggiore protezione dell'isolamento in paglia dagli agenti atmosferici.
Fonte: pajaconstruction.com



Intonaco in cemento dallo spessore di 3 cm applicato sul cappotto in balle di paglia.
Fonte: pajaconstruction.com



Rete portaintonaco metallica ancorata con fascette in plastica ai fili di legatura delle balle di paglia per permettere una migliore adesione dell'intonaco.
Fonte: pajaconstruction.com

Calkin's House



Luogo: Alburquesque (NM)

Progettista/i: Cadmond Whitty

Data origine costruzione: 1952

Anno realizzazione intervento: 2011

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a parete esistente

Contesto: suburbano

Realizzazione: impresa di costruzione

Joanne Calkins è la proprietaria di una vecchia costruzione in legno di circa 300 m² risalente al 1952 e situata ad Alburquesque, in New Mexico.

La situazione in cui verteva l'abitazione non era delle migliori: i costi per il riscaldamento e raffrescamento erano esorbitanti e le finestre erano costituite da vetri singoli e/o collocate in posizioni indesiderabili. Per cui Joanne decide di dare una seconda possibilità alla sua abitazione coibentandola con balle di paglia e aggiungendo un secondo piano. I lavori furono affidati a Cadmond Whitty, che aveva già effettuato altri interventi di riqualificazione usando la paglia, e durarono solo quattro mesi.

Gli interventi previsti riguardavano: l'applicazione di un cappotto in balle di paglia per il piano terra, la costruzione di un nuovo livello utilizzando il legno per la struttura e la paglia per i tamponamenti, la sostituzione di alcuni serramenti, lo spostamento di alcuni serramenti sul filo esterno del cappotto in paglia e l'installazione di pannelli solari.



Calkin's house

Fonte: pajaconstruction.com



Calkin's house

Fonte: pajaconstruction.com



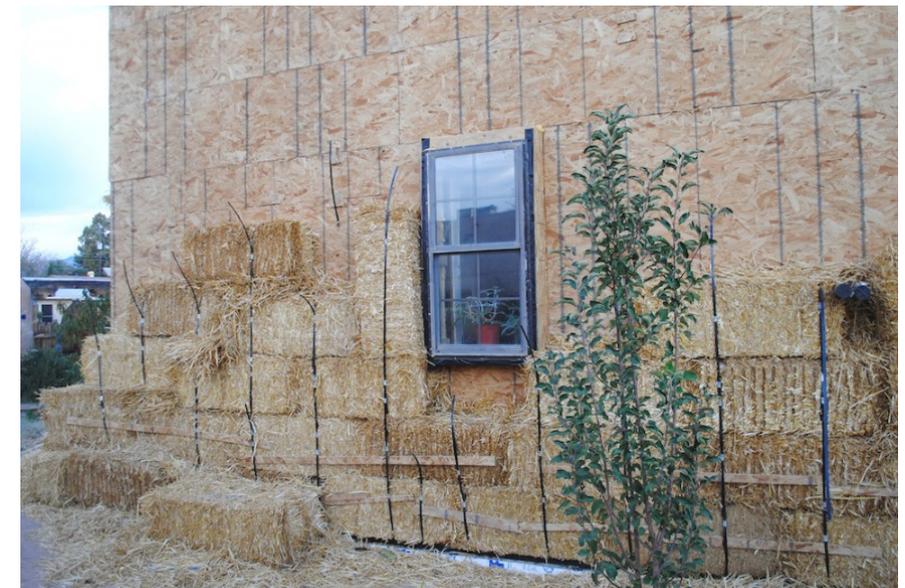
L'edificio prima dell'intervento di riqualificazione.
Fonte: pajaconstruction.com



Fondazione costituita da un cordolo in calcestruzzo, realizzata tutt'intorno al perimetro dell'abitazione.
Fonte: pajaconstruction.com



Nuovi pilastri (che dovranno scaricare il peso del piano superiore aggiunto) posizionati e ancorati saldamente al terreno.
Fonte: pajaconstruction.com



Pannelli OSB rivestono la superficie esterna dell'edificio. Successivamente sono state posizionate le balle di paglia (di piatto per uno spessore di circa 45 cm). Queste ultime sono state impilate e fissate alla parete esistente tramite delle cinghie.
Fonte: pajaconstruction.com



Nuovo livello costituito da una struttura in travi e pilastri (*post and beam*) tamponata da balle di paglia.
Fonte: pajaconstruction.com



Le balle di paglia rivestono l'intero edificio.
Fonte: pajaconstruction.com



L'edificio a seguito dell'applicazione dell'intonaco.
Fonte: pajaconstruction.com

Yannick Mollin House



Luogo: Laval (FR)

Progettista/i: -

Data origine costruzione: 1960

Anno realizzazione intervento: 2009

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: urbano

Realizzazione: autocostruzione

La casa preesistente è costituita in blocchi di cemento e risale agli anni '60, si trova a Laval, una cittadina della Francia occidentale.

Nel 2009 il proprietario decise di riqualificarla. Le chiusure verticali, spesse circa 30 cm (comprensive di intonaco interno, mattone forato, intercapedine d'aria, isolante in polistirene, mattone forato, intonaco esterno), risultavano già isolate, ma nonostante ciò l'edificio non risultava energeticamente efficiente. Quindi, si resero necessari numerosi interventi per migliorare la qualità del fabbricato: la copertura venne isolata attraverso un insufflaggio di cellulosa, venne applicato un cappotto in paglia, gli infissi furono sostituiti, vennero inseriti pannelli solari, un sistema di ventilazione meccanica controllata e una stufa a legna.



Yannick Mollin house
Fonte: treehugger.com



Yannick Mollin house durante i lavori di riqualificazione
Fonte: treehugger.com



Fondazioni composte da un basamento isolato (cls cellulare 15 cm e polistirene 10 cm) realizzata tutt'intorno al perimetro dell'abitazione.
Fonte: genitronsviluppo.com



Telaio (50x150 mm) impiegato per supportare i nuovi serramenti.
Fonte: genitronsviluppo.com



Telaio in legno (con elementi verticali distanziati da 1 a 2,8 m) fissato al basamento e alla parete esistente tramite tasselli e staffe metalliche.
Fonte: genitronsviluppo.com



Balle di paglia (spessore 35 cm) posizionate tra gli elementi del telaio.
Fonte: genitronsviluppo.com



Balle di paglia ancorate tramite listelli di piccole dimensioni alla struttura principale in legno.

Fonte: genitronsviluppo.com



Pannelli di Celenit circondano le aperture.

Fonte: genitronsviluppo.com



Mix di paglia e calce impiegato per riempire gli spazi vuoti tra balle (dovuti alla presenza della struttura in legno), gli angoli e gli spazi intorno alle aperture.

Fonte: genitronsviluppo.com



Intonaco di calce (circa 3 cm) posato direttamente sulla paglia.

Fonte: genitronsviluppo.com

Scuola materna e primaria "Montessori"



Luogo: Avignone (FR)

Progettista/i: Daniel Fanzutti

Data origine costruzione: -

Anno realizzazione intervento: 2012

Tipologia edificio: scuola

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: urbano

Realizzazione: impresa di costruzione

La nuova scuola "Montessori", la cui progettazione è stata diretta dall'arch. D. Fanzutti, si trova nella zona sud-orientale della Francia e più precisamente al centro della città di Avignone.

La volontà di ottenere un ambiente salubre è in conflitto con il suolo inquinato da tetracloroetilene su cui sorgerà la struttura. L'inquinamento può risalire per capillarità e disperdersi nell'ambiente interno dell'edificio.

L'edificio esistente è un magazzino industriale con struttura metallica e tamponamenti in blocchi di cemento dalla forma rettangolare con i lati maggiori esposti a Nord e a Sud.

Il nuovo progetto prevede la realizzazione di tre aule di 120 m² ciascuna, in modo da poter ospitare nel complesso 120 bambini, in accordo con il metodo Montessori.

L'intervento di riqualificazione prevedeva il consolidamento della struttura portante, l'abbattimento e successiva ricostruzione di parte della facciata nord e l'applicazione di un cappotto in paglia sulla muratura esistente.



Scuola materna e primaria "Montessori"
Fonte: esbg2015.eu



Scuola materna e primaria "Montessori"
Fonte: depierreisetdebois.com



L'edificio prima dell'intervento di riqualificazione.
Fonte: depierresetdebois.com



La struttura esistente da rinforzare in modo da poter sostenere il peso del cappotto interno che verrà applicato per isolare la copertura.
Fonte: depierresetdebois.com



Demolizione di parte della facciata nord.
Fonte: depierresetdebois.com



Struttura leggera in legno inserita per non sollecitare la struttura esistente. Quest'ultima detta la suddivisione degli spazi interni.
Fonte: depierresetdebois.com



La nuova struttura è stata progettata in modo da ricavare un nuovo livello calpestabile.
Fonte: depierresetdebois.com



Isolamento della copertura dall'interno con 28 cm di fibra di cellulosa insufflata.
Fonte: depierresetdebois.com



Cappotto esterno formato da una struttura in legno ancorata tramite delle staffe metalliche alla facciata esistente.
Fonte: depierresetdebois.com



Montanti verticali disposti ad 1 m di distanza in modo da poter ospitare una balla posata di piatto o due balle posate di coltello.
Fonte: depierresetdebois.com



Facciata nord ricostruita impiegando un'ossatura in legno tamponata con balle di paglia.
Fonte: depierresetdebois.com



Intonaco esterno composto da terra, fibre vegetali e laterizi polverizzati applicato direttamente sulle balle di paglia.
Fonte: depierresetdebois.com



Intonaco interno in terra applicato direttamente sui blocchi di cemento (per le pareti perimetrali).
Fonte: depierresetdebois.com

Wihan's house



Luogo: Bražec (CZ)

Progettista/i: Kuba Wihan

Data origine costruzione: intorno al 1950

Anno realizzazione intervento: 2009

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a parete esistente

Contesto: rurale

Realizzazione: autocostruzione

Il progetto è localizzato a Bražec, in Repubblica Ceca, in una zona rurale.

L'edificio esistente, poco performante, era composto da pareti in mattoni spesse 40 cm, così l'arch. Kuba Wihan, decise di operare un massiccio intervento di riqualificazione che comportò: intervento di isolamento della chiusura superiore utilizzando la paglia, cappotto esterno in paglia per le chiusure verticali, apertura di ampie vetrate sul lato sud del fabbricato, sostituzione degli infissi e del pavimento. L'intero intervento è stato realizzato in autocostruzione, durante il workshop di dodici giorni tenuto da *Amazonails*.



Wihan's house

Fonte: strawworks.co.uk



Wihan's house durante i lavori di riqualificazione

Fonte: strawworks.co.uk



Cordolo in mattoni (una testa) realizzato per sollevare le balle dal terreno di circa 35 cm.
Fonte: strawworks.co.uk



Il cordolo (che prosegue per 60 cm sotto il livello del terreno) riempito con argilla espansa.
Fonte: strawworks.co.uk



Foglio di carta catramata applicato sull'ultimo corso di mattoni del basamento.
Fonte: strawworks.co.uk



Basetta in legno composta da assi in legno assemblate e fissate tra loro con viti funge da supporto per il primo corso di balle di paglia.
Fonte: strawworks.co.uk



Elementi orizzontali in legno fissati su tutti e quattro i lati dell'edificio per permettere, successivamente, la compressione delle balle di paglia.

Fonte: strawworks.co.uk



Sottili elementi verticali in legno fissati alla basetta per facilitare il posizionamento del primo corso di balle di paglia (spesse 27 cm).

Fonte: strawworks.co.uk



Strato di intonaco applicato muratura esistente per eliminare le discontinuità. Occhielli metallici fissati alla struttura esistente per legare le balle.

Fonte: strawworks.co.uk



Balle legate verticalmente da sottili elementi lignei (ogni elemento copre 3 corsi di balle) a loro volta legati orizzontalmente tramite un nastro in poliestere.

Fonte: strawworks.co.uk



Balle di paglia compresse attraverso l'impiego di martinetti idraulici.
Fonte: strawworks.co.uk



Intonaco in terra (spessore circa 4 cm) steso direttamente sulle balle.
Fonte: strawworks.co.uk

House Simma



Luogo: Egg (A)

Progettista/i: Georg Bechtel

Data origine costruzione: 1966

Anno realizzazione intervento: 2011

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: rurale

Realizzazione: impresa di costruzione

L'edificio si trova in Austria, più precisamente a Egg, ed è stato seguito dall'arch. Georg Bechtel.

Si tratta di un'abitazione privata di 140 m², dove il progettista ha cercato di migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio, intervenendo su un fabbricato degli anni '60.

Il seminterrato e il piano terra dell'edificio esistente sono stati mantenuti e resi termicamente più performanti dal cappotto in paglia. Invece, il piano superiore è stato demolito e ricostruito impiegando un telaio in legno tamponato con balle di paglia.

È importante notare che l'abitazione originariamente possedeva un muro perimetrale spesso 37 cm (comprensivo di intonaco interno, muratura in mattoni e rivestimento in legno). Con l'apposizione del cappotto, la componente opaca di questo edificio si avvicina ai 90 cm di spessore, per cui sono state utilizzate delle strategie per ottimizzare l'ingresso della luce naturale.

All'interno è stato installato un sistema di ventilazione meccanica controllata con recupero di calore, inoltre, per soddisfare il fabbisogno di riscaldamento dell'abitazione è stato sufficiente inserire una stufa alimentata a legna.



House Simma
Fonte: architonic.com



House Simma
Fonte: architonic.com



Telaio in legno (ancorato alla struttura esistente tramite tasselli e staffe angolari) ospita e tiene in compressione le balle di paglia (spessore 38 cm).
Fonte: architonic.com



Telai delle finestre rastremati verso l'esterno per ovviare al problema della scarsa penetrazione solare.
Fonte: architonic.com



Rivestimento in scandole lignee ancorato ad una struttura di supporto costituita da listelli in legno a loro volta ancorati ad uno strato di OSB che riveste le balle di paglia.
Fonte: architonic.com

L'esperienza Italiana

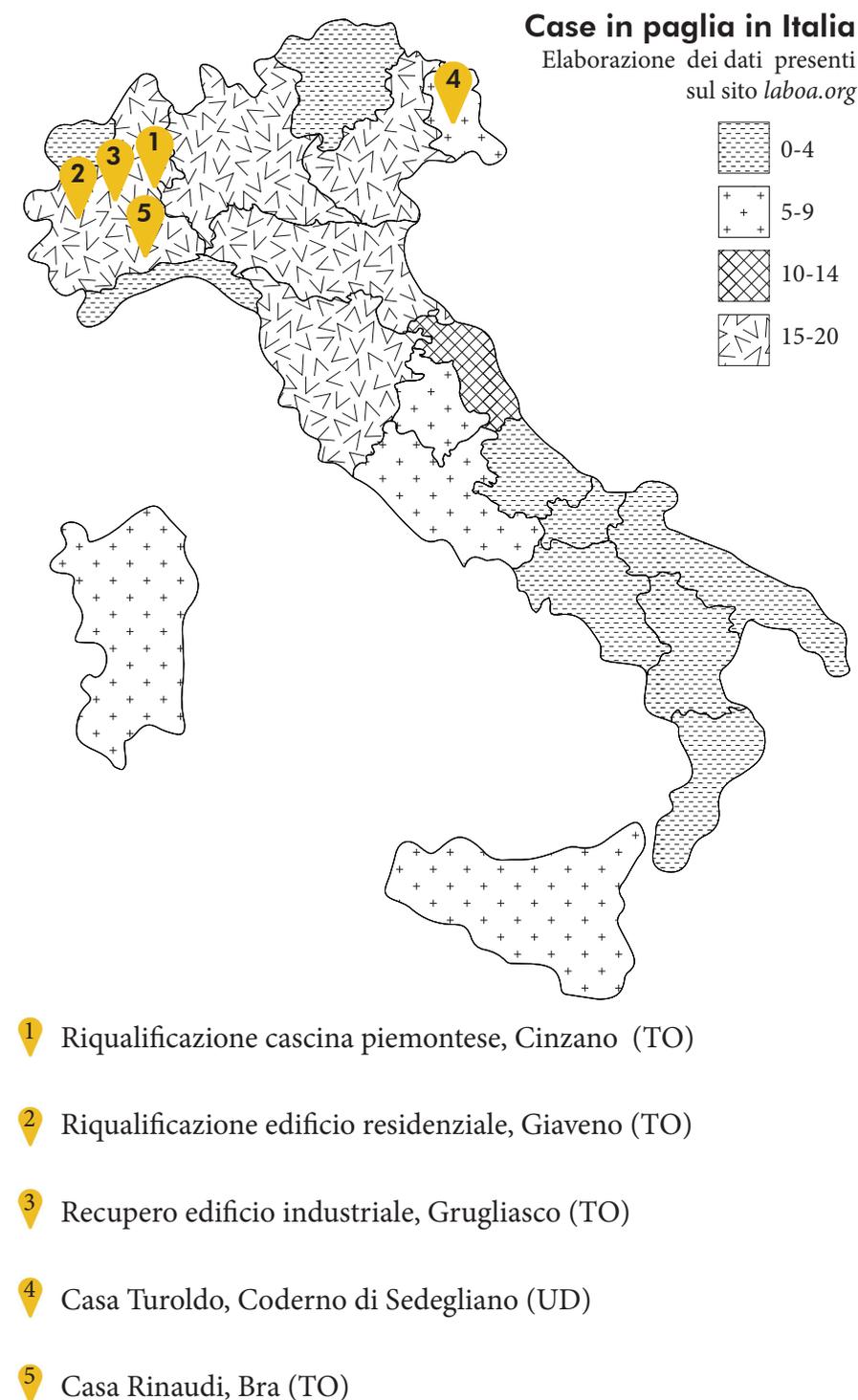
In Italia si iniziò a parlare di edifici in paglia negli anni '90 quando Stefano Soldati⁸⁰, imparò da Barbara Jones e divenne uno dei primi sperimentatori di questo inusuale modo di costruire. Fu proprio la Jones che permise, prima in Inghilterra e poi nel resto dell'Europa occidentale, la diffusione delle costruzioni in paglia adattando le tecniche tradizionali alle condizioni climatiche Europee.

Oggi, è in atto nel nostro Paese una lenta ma costante diffusione di questo metodo costruttivo, seppur non ancora supportato dalla normativa italiana: secondo le *Norme Tecniche per le Costruzioni* in vigore dal 1° luglio 2009 non è possibile utilizzare la paglia a fini strutturali. Invece, può essere utilizzata come tamponamento di strutture in legno, cemento armato o acciaio. Da qualche anno a questa parte anche gli interventi di riqualificazione che impiegano la paglia sono sempre più numerosi. Si tratta per lo più di cappotti esterni, applicati sulla struttura esistente, solitamente costituita da laterizi e termicamente poco efficiente. Nella pagina di fianco sono stati rielaborati graficamente i dati presenti sul sito *laboa.org*⁸¹, i quali indicano la presenza e la localizzazione di case in paglia in Italia (sia che si tratti di interventi di riqualificazione che di nuova costruzione). Non si tratta ovviamente di un vero e proprio censimento, poichè l'adesione è volontaria.

Nelle pagine che seguono, invece, sono riportati alcuni esempi di interventi di riqualificazione presenti sul territorio italiano.

⁸⁰ esperto di cerealicoltura, agricolture alternative e permacultura. Dal 2003 si occupa di costruzioni in paglia. Ad oggi ha lavorato su 51 edifici autorizzati in paglia in Italia e all'estero o supportando i progettisti e/o insegnando l'autocostruzione.

⁸¹ sito internet gestito da Stefano Soldati. È possibile prenotarsi ai corsi da esso tenuti, approfondire temi quali: le costruzioni in paglia, la permacultura e le food forest.



Riqualificazione cascina piemontese

Luogo: Cinzano (TO)

Progettista/i: Alessandro Fassi

Data origine costruzione: 1960

Anno realizzazione intervento: 2007-2009

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a parete esistente

Contesto: rurale

Realizzazione: autocostruzione e impresa di costruzione



L'intervento risulta innovativo trattandosi del primo esempio in Italia di recupero edilizio con utilizzo di balle di paglia per il cappotto esterno. L'edificio esistente, risalente al 1960, era composto da una zona di residenza e una zona destinata a funzioni agricole, si trova a Cinzano in provincia di Torino. Si tratta di una cascina piemontese realizzata con tecniche tradizionali: muri portanti in laterizi pieni, cotti e crudi, solai in legno e tavelle in laterizio, volta a vela in mattoni, voltine in mattoni poggianti su travi in legno e voltini in laterizio e profilati metallici. Mentre per la copertura sono stati utilizzati coppi curvi su un'orditura in legno alla piemontese (travi, falsi puntoni, travetti). L'intervento di riqualificazione prevedeva: la sostituzione della copertura, l'impiego di un cappotto in balle di paglia per le chiusure verticali, l'isolamento del solaio controterra con paglia e massetto in paglia-cemento e, infine, la sostituzione di tutti i serramenti.

I lavori a cura dell'arch. Alessandro Fassi iniziarono nel 2007 e terminano dopo due anni, nel 2009.



Edificio residenziale a Cinzano

Fonte: Tesi di laurea "Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un "cappotto" per edificio esistente" di Andrea Peretti.



Edificio residenziale a Cinzano durante i lavori di riqualificazione

Fonte: Tesi di laurea "Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un "cappotto" per edificio esistente" di Andrea Peretti.



L'edificio prima dei lavori di riqualificazione.

Fonte: Tesi di dottorato *“Stra(w)isolami. Analisi tecnologica di edifici esistenti isolati con balle di paglia”* di Anna Rita Bertorello.



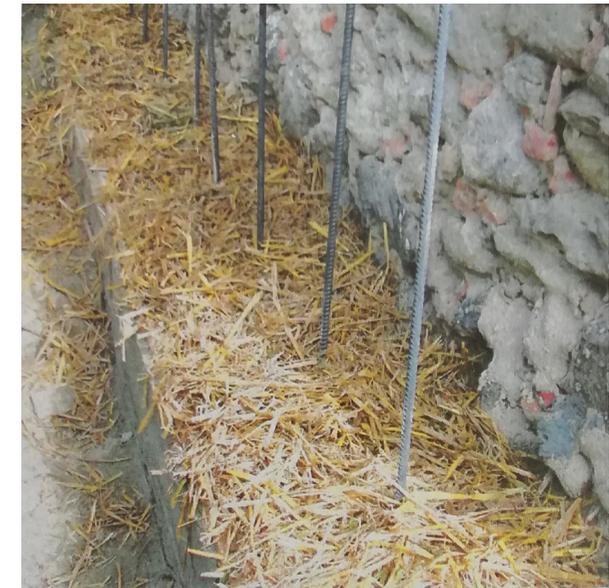
Fondazioni in cemento armato.

Fonte: Tesi di laurea *“Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un “cappotto” per edificio esistente”* di Andrea Peretti.



Basetta in legno impiegata per evitare l'appoggio diretto delle balle sul cordolo di fondazione.

Fonte: Tesi di laurea *“Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un “cappotto” per edificio esistente”* di Andrea Peretti.



Barre di armatura annegate nel getto e utilizzate per ancorare al basamento i primi corsi di balle.

Fonte: Tesi di laurea *“Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un “cappotto” per edificio esistente”* di Andrea Peretti.



Picchetti in legno di sezione quadrata (4x4 cm) e di un metro di lunghezza utilizzati per il fissare i corsi di balle superiori al terzo.

Fonte: Tesi di laurea *“Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un “cappotto” per edificio esistente”* di Andrea Peretti.



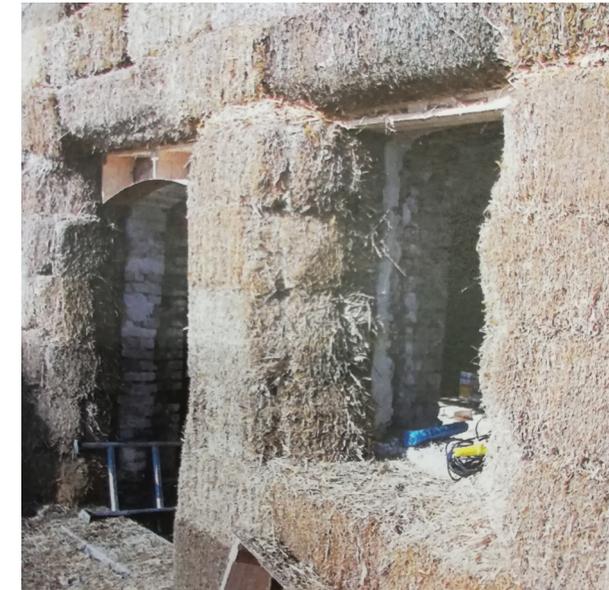
Occhielli metallici tassellati alla parete esistente in corrispondenza del settimo corso. Ad ogni occhiello ne dovrà corrispondere un altro fissato nel cordolo.

Fonte: Tesi di laurea *“Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un “cappotto” per edificio esistente”* di Andrea Peretti.



Balle ancorate al muro attraverso reggette in polipropilene fatte passare attraverso gli occhielli metallici.

Fonte: Tesi di laurea *“Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un “cappotto” per edificio esistente”* di Andrea Peretti.



Rete portaintonaco in fibra di vetro applicata sulle balle rasate. Successivamente è stato applicato l'intonaco in calce.

Fonte: Tesi di laurea *“Costruire con la paglia : progetto e realizzazione in autocostruzione di un “cappotto” per edificio esistente”* di Andrea Peretti.

Riqualificazione edificio residenziale



Luogo: Giaveno (TO)

Progettista/i: Studio di Architettura *GREEN THINK*

Data origine costruzione: -

Anno realizzazione intervento: -

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: suburbano

Realizzazione: impresa di costruzione

L'intervento prevede la riqualifica di un edificio monofamiliare di 73 m² attraverso la realizzazione di nuovo cappotto in legno e paglia da applicare al piano primo (nella porzione abitativa dell'immobile).

L'edificio preesistente è così composto: al piano terreno è presente una struttura in calcestruzzo armato e tamponamenti in laterizio, mentre al primo piano c'è una struttura in profili metallici che sorregge i pannelli prefabbricati in legno-cemento.

L'intervento prevede l'applicazione di un cappotto in paglia per le strutture opache verticali e il miglioramento delle prestazioni termiche del solaio attraverso dei pannelli in fibra di legno.

Le balle di paglia sono state inserite all'interno di una struttura in legno e poi protette sul lato esposto da una parete ventilata in doghe di legno. Mentre sul lato interno si è provveduto al totale rifacimento delle finiture, prevedendo l'impiego di intonaci a base di argilla.



Edificio residenziale a Giaveno
Fonte: naturalmentepaglia.com



Edificio residenziale a Giaveno durante i lavori di riqualificazione
Fonte: naturalmentepaglia.com



L'edificio prima dell'intervento.
Fonte: naturalmentepaglia.com



Paglia inserita all'interno di un telaio in legno, a sua volta bullonato alla struttura esistente tramite piastre metalliche.
Fonte: naturalmentepaglia.com



Cappotto in paglia applicato solo alla porzione abitata dell'immobile, cioè al primo piano.
Fonte: naturalmentepaglia.com

Recupero edificio industriale



Luogo: Grugliasco (TO)

Progettista/i: Studio di Architettura *GREEN THINK*

Data origine costruzione: circa 1950

Anno realizzazione intervento: -

Tipologia edificio: edificio industriale

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: suburbano

Realizzazione: impresa di costruzione

Si tratta del primo intervento italiano di recupero di un edificio industriale degli anni '50 in cui si sono volute promuovere due strategie parallele: il risanamento energetico dell'edificio mediante l'uso di materiali naturali e il miglioramento del benessere del luogo di lavoro.

Il recupero della struttura è avvenuto mediante la demolizione di porzioni di muratura esterne in laterizio con lo scopo di poter posare le balle di paglia e correggere i ponti termici correlati alla struttura in cemento armato preesistente. L'intervento, che interessa una superficie di circa 7.000 m², si è sviluppato per fasi e riguarda non solo l'involucro ma anche l'impiantistica, permettendo di ridurre il fabbisogno reale dell'edificio di oltre l'80%.

Mediante l'utilizzo di legno, paglia e calce naturale (utilizzata sia per gli intonaci interni che per quelli esterni) si è garantito un livello di benessere interno finalizzato a sostenere la produttività e la salute dei lavoratori.



Edificio industriale a Grugliasco durante i lavori di riqualificazione.
Fonte: naturalmentepaglia.com



Edificio industriale a Grugliasco durante i lavori di riqualificazione.
Fonte: naturalmentepaglia.com



L'interno dell'edificio prima dell'intervento.
Fonte: naturalmentepaglia.com



L'esterno dell'edificio prima dell'intervento. Porzioni di muratura esterna sono state abbattute.
Fonte: naturalmentepaglia.com



Telaio in OSB ancorato alla struttura esistente e posizionato per permettere l'alloggio delle balle di paglia.
Fonte: cimbano.blogspot.com



Balle di paglia posizionate tra gli elementi del telaio.
Fonte: cimbano.blogspot.com



Balle compresse con martinetti idraulici da 2000 kg.
Fonte: naturalmentepaglia.com



Balle di paglia rasate. Successivamente è stato applicato un intonaco in calce.
Fonte: cimbano.blogspot.com

Casa Turoldo



Luogo: Coderno di Sedegliano (UD)

Progettista/i: Domenico Pepe

Data origine costruzione: antecedente al 1800

Anno realizzazione intervento: 2016

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: urbano

Realizzazione: impresa di costruzione

L'intervento sull'immobile sito a Coderno di Sedegliano, in provincia di Udine, è rivolto al suo recupero in armonia con il contesto in cui lo stesso si colloca con un'ottica di manutenzione conservativa e quindi senza alterarne l'omogeneità estetica con il Borgo.

L'edificio fa parte di una struttura all'interno di una corte tipica friulana realizzata prima del 1800.

La struttura esistente era composta da un primo piano padronale che originariamente ospitava le stanze abitate, un piano terra per il ricovero degli animali e un sottotetto per il deposito dei prodotti dell'attività agricola.

La struttura è in pietra e mattoni con tetto e solai in legno. Inoltre, questo fabbricato dalla forma vagamente rettangolare, presenta due lati in adiacenza con un'altra residenza e un lato su strada vincolato a mantenere la sua omogeneità estetica con il borgo.

Dopo decenni di abbandono, nel 2014 l'edificio venne acquistato dall'attuale proprietario, David Turoldo, con l'intenzione di ristrutturarlo. Per l'isolamento si è optato per un cappotto in paglia interno su tre lati ed esterno sul lato non vincolato e non in adiacenza con gli altri fabbricati.



Casa Turoldo

Fonte: domenicopepe.eu



Casa Turoldo

Fonte: domenicopepe.eu

Casa Rinaudi



Luogo: Bra (CN)

Progettista/i: Studio di architettura *Casa di paglia*,

Data origine costruzione: 1966

Anno realizzazione intervento: 2017

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: rurale

Realizzazione: autocostruzione e impresa di costruzione

L'edificio esistente era un ciabòt, cioè un piccolo fabbricato caratteristico dei vigneti piemontesi nato per soddisfare alcune necessità legate al lavoro della viticoltura. Francesca, la proprietaria, nel 2016 decise di ristrutturare lo stabile del nonno affidandosi agli architetti A. Veglio ed E. Castagno dello studio di architettura *Casa di paglia*. Al loro arrivo era già presente la nuova struttura composta da travi e pilastri in cemento armato. Con il nuovo progetto si volevano ridurre i consumi, gestire il rapporto con la collina limitrofa e creare una forte relazione tra gli spazi interni e gli spazi esterni, mantenendo, allo stesso tempo, l'immagine dell'edificio esistente.

In questo intervento, la paglia è stata utilizzata come tamponamento della struttura in c. a., mentre per quanto riguarda il tetto, è stata posizionata tra le travi in legno.

Il nuovo edificio, a seguito dei lavori di ristrutturazione, misura 75 m² e nel prospetto Nord conserva la memoria del vecchio ciabòt.



Casa Rinaudi

Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Casa Rinaudi

Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Fig. 69 L'edificio prima dell'intervento.

Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Cordolo in legno impiegato per sollevare il primo corso di balle dal terreno.

Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Pareti del garage e la nuova struttura in travi e pilastri in c.a. già presenti all'arrivo dei progettisti.

Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Struttura in c.a. ricoperta da pannelli in compensato marino. Degli elementi verticali in OSB sono stati posizionati tra un pilastro e l'altro per poter inserire le balle.

Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Balle posizionate tra gli elementi verticali in OSB.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Struttura ricoperta da materiale isolante per evitare la formazione di ponti termici dovuti alla presenza di c.a.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



L'edificio completamente tamponato. Si procede al tamponamento della copertura.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Intonaco (composto da grassello di calce e sabbia) applicato su parte della parete.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno

LA PAGLIA:
OPINIONI E PROSPETTIVE

In questo capitolo si riportano le indagini eseguite allo scopo di indagare, in primis, se e in che modo la paglia viene utilizzata dai professionisti e poi, cosa pensano le persone non specializzate dell'impiego della paglia in architettura.

Sono stati selezionati due strumenti di indagine: un questionario on-line composto da domande a risposta chiusa e un'intervista diretta. Il primo è stato sottoposto, seppur con le opportune variazioni nella composizione, a persone non specializzate nel campo dell'architettura e a professionisti che non lavorano quotidianamente con questo materiale. Mentre il secondo, composto da una serie di domande a risposta aperta, è stato sottoposto ad una serie di professionisti specializzati nell'ambito delle costruzioni in paglia. Quasi tutte le figure professionali intervistate operano sul territorio torinese o, più in generale, piemontese, ad eccezione dell'arch. Preti per il quale è stata svolta un'intervista via *Skype* in quanto egli esercita la sua professione nel Veronese.

Il punto di vista delle persone non specializzate: risultati del questionario on-line “La paglia in architettura”

Strutturazione dell'indagine

L'indagine è stata eseguita su un campione di 257 persone tramite la funzione Moduli di Google, si tratta quindi di un questionario on-line divulgato tramite e-mail e social network in un periodo di tempo compreso tra il 28 ottobre 2019 e il 5 dicembre 2019. Il suddetto questionario è rivolto a tutte le persone che non sono professionisti del settore dell'architettura.

I dati raccolti sono anonimi e sono stati utilizzati solo nell'ambito della presente tesi di laurea.

Il questionario è strutturato in quattro sezioni così intitolate: *profilo dell'intervistato*, *conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia*, *opinione dell'intervistato sul tema delle costruzioni in paglia*, *direzioni future: verso un mondo più green?*.

La prima sezione *profilo dell'intervistato* è composta da tre domande volte a conoscere meglio l'interlocutore. Le domande sono:

- 1. Età;
- 2. Istruzione;

- 3. Professione;

La seconda sezione *conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia* è composta da sei domande e ha lo scopo di creare un primo approccio, in modo generico, al tema delle costruzioni in paglia. L'obiettivo di questa sezione è capire se l'intervistato è informato sul tema. Le domande sono:

- 4. Ha mai sentito parlare di costruzioni in paglia?;
- 5. Se sì, dove?;
- 6. Se ha risposto affermativamente alla domanda 5, ha approfondito ulteriormente l'argomento delle costruzioni in paglia?;
- 7. Vorrebbe farlo in futuro?;
- 8. In che modo giudica la sua competenza riguardo le costruzioni in paglia?;

La terza sezione *opinione dell'intervistato sul tema delle costruzioni in paglia* è composta da sei domande che hanno l'obiettivo di entrare nel merito dell'argomento trattato per capire quanto l'intervistato è informato sul tema e se possiede delle competenze di base. Le domande sono:

- 9. Costruirebbe la sua casa in paglia?;
- 10. Se sì, per quali ragioni?;
- 11. Se no, per quali ragioni?;
- 12. Ipotizzando che debba costruire la sua casa, l'architetto/ingegnere le propone di utilizzare la paglia...;
- 13. Quali crede siano le maggiori preoccupazioni riguardo le costruzioni in paglia?;
- 14. Qual è la sua posizione riguardo all'uso della paglia nelle costruzioni?.

L'ultima sezione *direzioni future: verso un mondo più green?* si distacca dalle precedenti poiché ha lo scopo di capire quanto l'intervistato è sensibile nei confronti di temi quali l'ambiente, l'ecologia e la sostenibilità energetica ed ambientale. Il fine ultimo è quello di capire in che direzione ci si muoverà da adesso in avanti e comprendere se le persone sono pronte ad un cambiamento di rotta indirizzato verso il mondo della sostenibilità. Le domande sono:

- 15. Si ritiene una persona attenta all'ambiente?;
- 16. Per lei, quanto è importante vivere in una casa “ecologica”?;

- 17. Quanto considera significativi i seguenti fattori nella scelta di una casa? (classe energetica, uso di materiali da costruzione naturali, predisposizione per l'uso di fonti energetiche rinnovabili, isolamento delle pareti, isolamento dei serramenti, performance degli impianti, salubrità degli ambienti interni, costi di gestione, costi di investimento iniziali, uso di materiali riutilizzabili o riciclabili, aspetto).

Risultati

Di seguito sono riportati i risultati principali emersi a seguito delle interviste.

Per quanto riguarda la prima sezione *profilo dell'intervistato*:

- la maggior parte degli intervistati (45,5%) si colloca in una fascia d'età compresa tra i 40 e i 65 anni, mentre un'altra porzione consistente (36,5%) presenta un'età compresa tra i 18 e 25 anni;
- quasi tutti gli intervistati sono in possesso di una laurea (47,8%) o di un diploma di scuola superiore (43,5%);
- la maggioranza degli intervistati lavora (70,6%) mentre la restante parte studia.

Per quanto riguarda la seconda sezione *conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia*:

- buona parte degli intervistati (57,6%) ha già sentito parlare di costruzioni in paglia per lo più su riviste, sul web, in ambito accademico o grazie a persone terze;
- dopo averne sentito parlare, la maggioranza degli intervistati (74,1%) non si è ulteriormente informata, ma vorrebbe farlo in futuro (75,3%);
- quasi tutti gli intervistati (87,2%) non si ritengono preparati riguardo le costruzioni in paglia.

Per quanto riguarda la terza sezione *opinione dell'intervistato sul tema delle costruzioni in paglia*:

- buona parte degli intervistati (62,3%) non costruirebbe la sua casa in paglia soprattutto a causa della propria disinformazione. Tra gli

altri motivi vi sono la scarsa conoscenza personale di professionisti esperti nel settore, la convinzione che la paglia sia meno durevole rispetto ai materiali tradizionali e che i professionisti non siano abbastanza preparati;

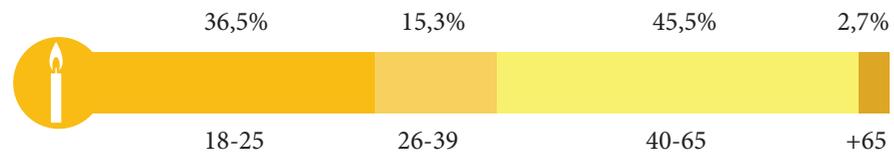
- la restante parte degli intervistati (37,7%) risulta propensa a costruire la propria casa in paglia al fine di ridurre l'impatto ambientale del nuovo edificio, promuovere la conoscenza di nuovi sistemi tecnologici e materiali alternativi e promuovere l'uso consapevole delle risorse.
- tra le maggiori preoccupazioni degli intervistati nei confronti della paglia vi sono il timore che la paglia sia facilmente deteriorabile, che non sia resistente agli agenti atmosferici, che sia facilmente infiammabile e aggredibile da insetti e organismi viventi;
- la maggioranza degli intervistati (62,2%) si ritiene neutrale nei confronti dell'impiego della paglia in architettura, mentre solo una piccola parte (32,7%) risulta favorevole.

Per quanto riguarda la quarta sezione *direzioni future: verso un mondo più green?*:

- la maggior parte degli intervistati (94,5%) si ritiene attenta o abbastanza attenta all'ambiente e per una buona parte (78,5%) è importante vivere in una casa ecologia;
- i fattori ritenuti maggiormente significativi nella scelta di una casa sono, dal più importante al meno importante, l'isolamento delle pareti e la salubrità degli ambienti, l'isolamento dei serramenti, la predisposizione per l'uso di fonti energetiche rinnovabili, la classe energetica e la performance degli impianti. Mentre in coda vi sono i costi di gestione, l'aspetto, l'uso di materiali riciclabili o riutilizzabili, i costi di investimento iniziali e l'uso di materiali da costruzione naturali.

Profilo dell'intervistato

1. Et 



2. Istruzione



3. Professione

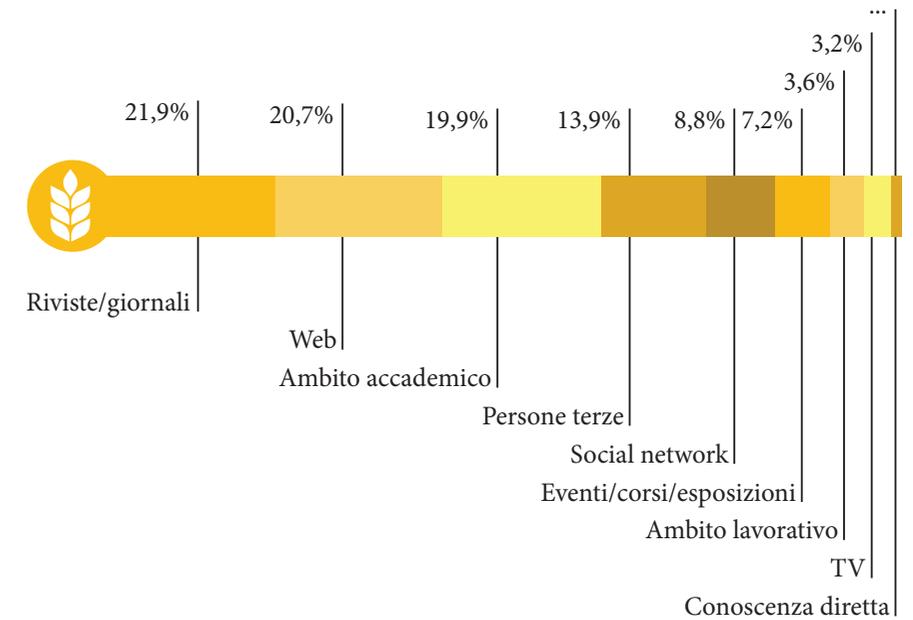


Conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia

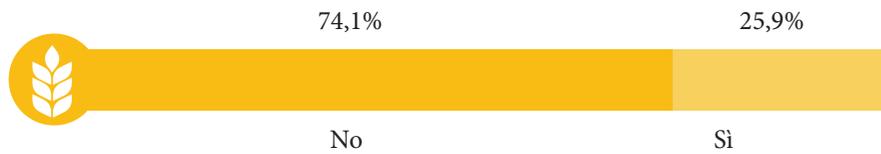
4. Ha mai sentito parlare di costruzioni in paglia?



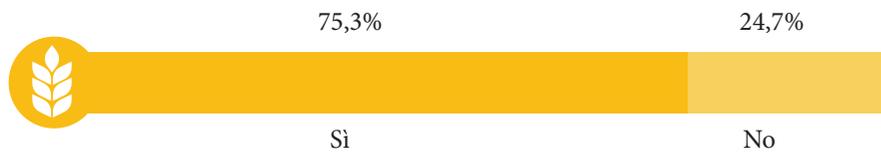
5. Se s , dove?



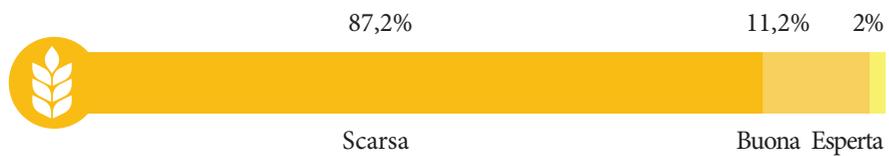
6. Se ha risposto affermativamente alla domanda 5, ha approfondito ulteriormente l'argomento delle costruzioni in paglia?



7. Vorrebbe farlo in futuro?



8. In che modo giudica la sua competenza riguardo le costruzioni in paglia?

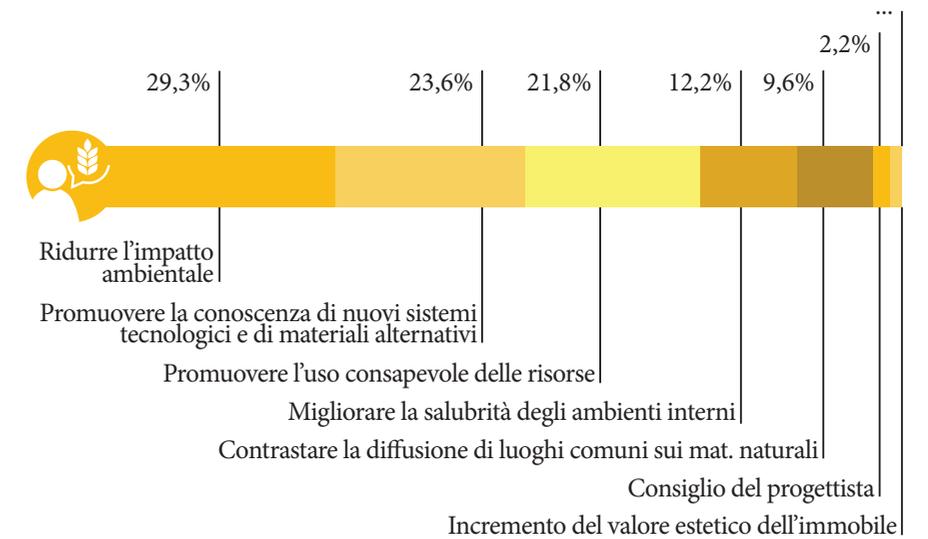


Opinione dell'intervistato sul tema delle costruzioni in paglia

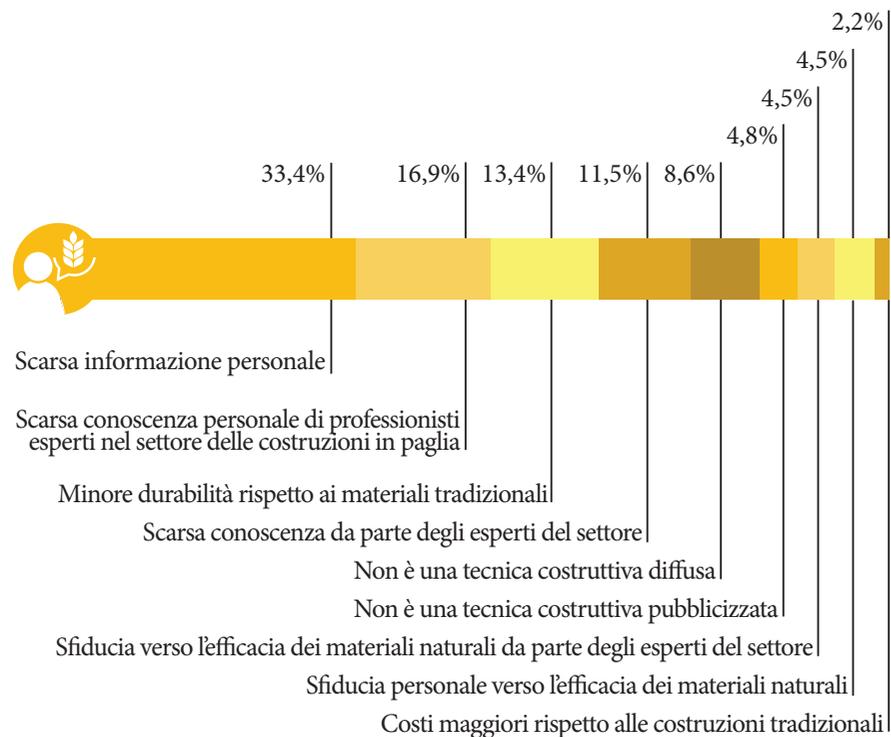
9. Costruirebbe la sua casa in paglia?



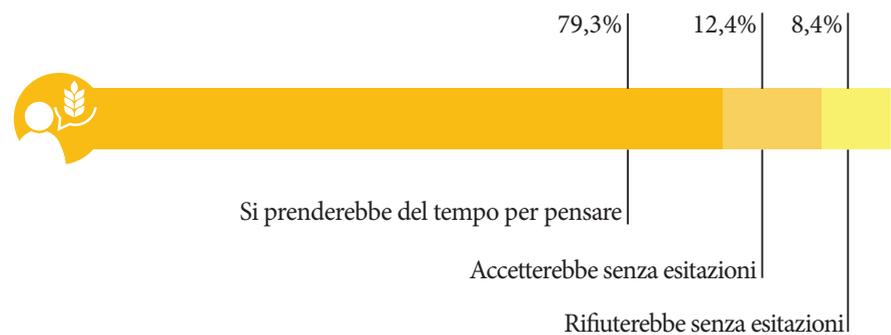
10. Se sì, per quali ragioni?



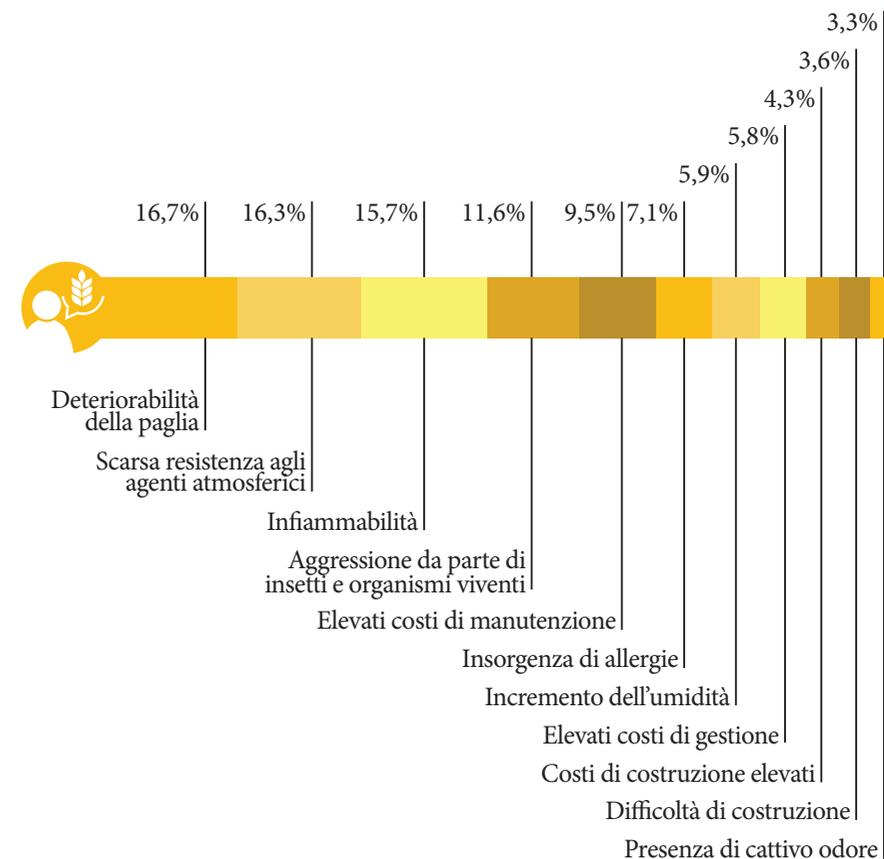
11. Se no, per quali ragioni?



12. Ipotizzando che debba costruire la sua casa, l'architetto/ingegnere le propone di utilizzare paglia...



13. Quali crede siano le maggiori preoccupazioni riguardo le costruzioni in paglia?



14. Qual è la sua posizione riguardo all'uso della paglia nelle costruzioni?

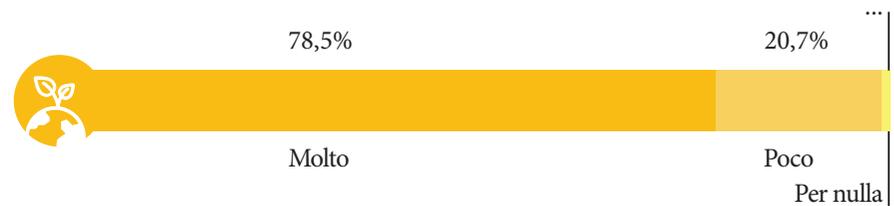


Direzioni future: verso un mondo più green?

15. Si ritiene una persona attenta all'ambiente?

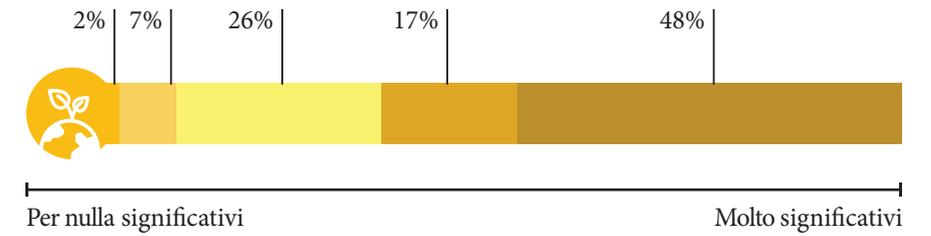


16. Per lei, quanto è importante vivere in una casa "ecologica"?

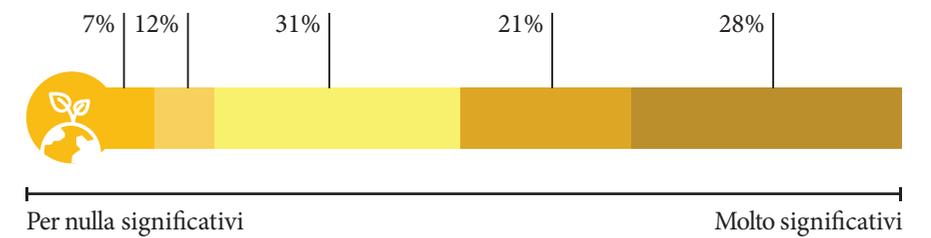


17. Quanto considera significativi i seguenti fattori nella scelta di una casa?

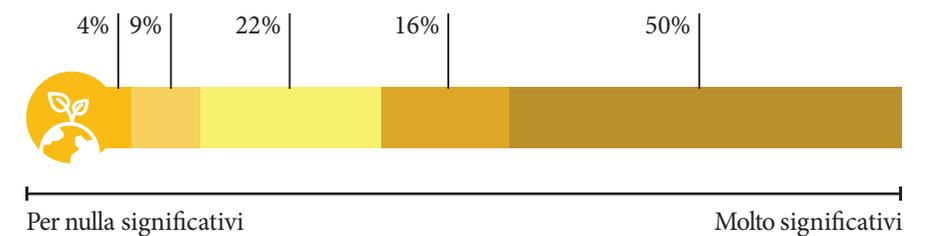
Classe energetica



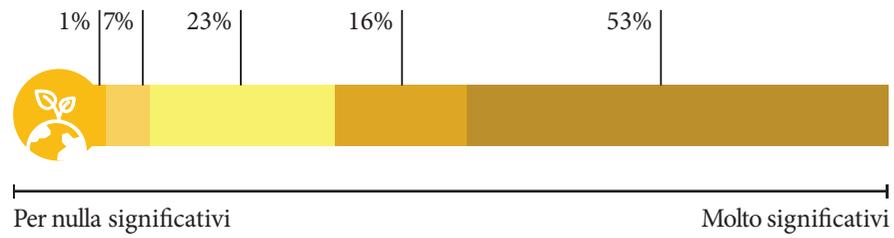
Uso di materiali da costruzione naturali



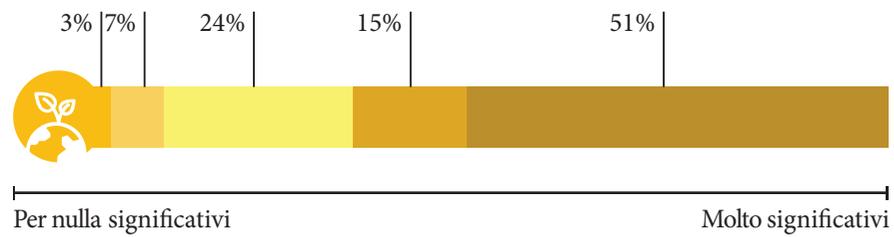
Predisposizione per l'uso di fonti energetiche rinnovabili



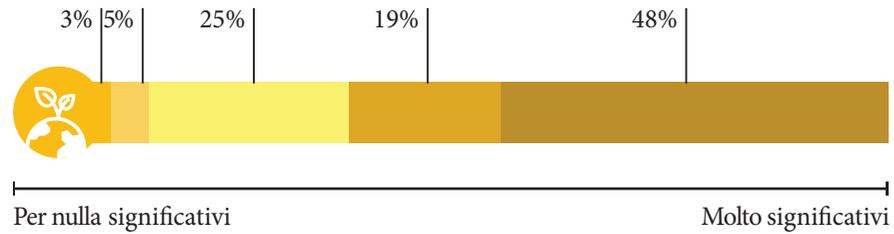
Isolamento delle pareti



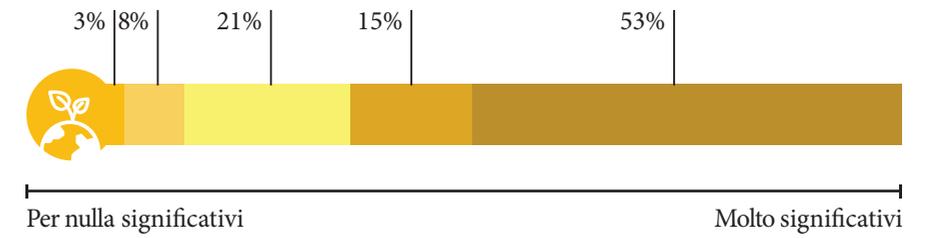
Isolamento dei serramenti



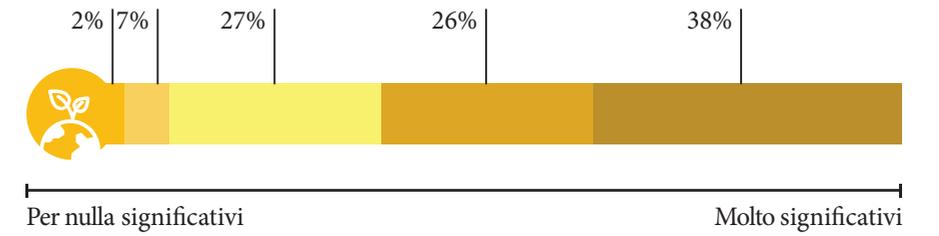
Performance degli impianti



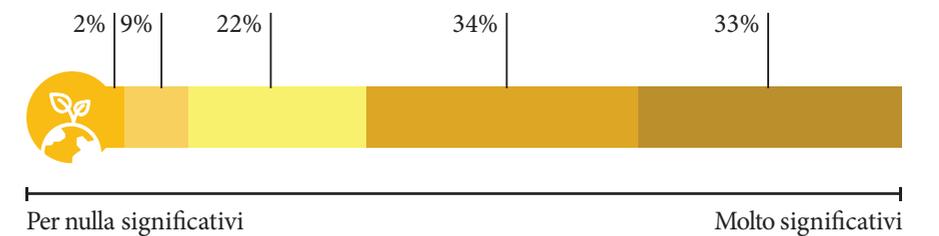
Salubrità degli ambienti interni



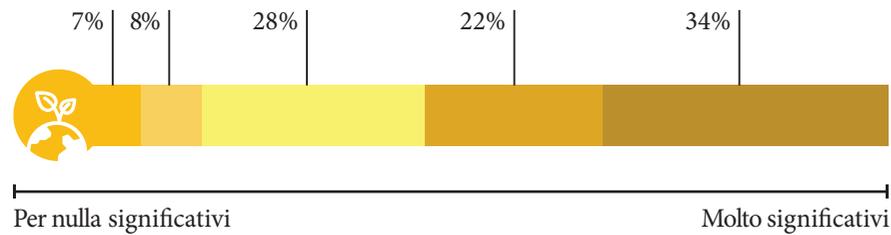
Costi di gestione



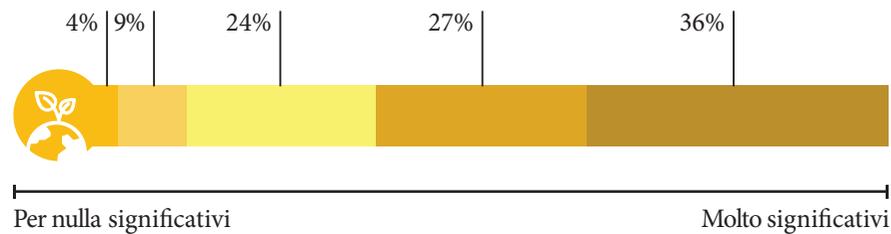
Costi di investimento iniziali



Uso di materiali riutilizzabili o riciclabili



Aspetto



Conclusioni

Dalla somministrazione del questionario, emergono alcuni dati significativi, a proposito dei quali sono nate riflessioni considerevoli che caratterizzano una parte importante di questo lavoro di tesi.

Emerge che da parte dell'utente c'è molta disinformazione. Nel senso che, anche se buona parte degli intervistati dichiara di aver già sentito parlare di costruzioni in paglia, risultano ancora radicate convinzioni sbagliate e pregiudizi. Quindi questa disinformazione diffusa porta ad eliminare precocemente la paglia dalla sfera delle possibilità e porta a credere a luoghi comuni quali l'inflammabilità, la deteriorabilità e la vulnerabilità nei confronti di insetti e roditori. Ne consegue che non potrà mai verificarsi un massiccio sviluppo di nuove tecniche e materiali se si rimane ancorati a convinzioni sbagliate.

Un modo per contrastare il verificarsi di questo scenario è promuovere la sensibilizzazione attraverso vari canali quali il web, la televisione, le fiere, gli eventi, i workshop, etc. Si attiverebbe così un apprendimento "leggero" e accessibile da parte di ogni fascia d'età. Sarebbe molto importante dare maggiore spazio alla pratica, dal momento in cui oggi le esperienze di workshop sono molto poche e solitamente vi si interfacciano per lo più persone che sono già iniziate al tema.

Inoltre, dai risultati affiora che l'attenzione all'ambiente non passa attraverso la casa. In altre parole, anche se la maggior parte degli intervistati si reputa attenta all'ambiente e ritiene importante vivere in una casa ecologica non costruirebbe la propria casa in paglia. Quindi, nella teoria tutto fila liscio, ma nella pratica non si è ancora pronti ad attuare azioni concrete al fine di migliorare la situazione in cui versa il pianeta.

Il punto di vista dei professionisti: risultati del questionario on-line “La paglia in architettura”

Strutturazione dell'indagine

L'indagine è stata eseguita su un campione di 31 persone tramite la funzione Moduli di Google, si tratta quindi di un questionario on-line divulgato tramite e-mail in un periodo di tempo compreso tra il 28 ottobre 2019 e il 5 dicembre 2019. Il suddetto questionario è rivolto ai professionisti del settore edile (architetti, ingegneri, geometri, etc) che quotidianamente non si occupano di paglia in ambito lavorativo. anche in questo caso, i dati raccolti sono anonimi e sono stati utilizzati solo nell'ambito della presente tesi di laurea.

Come quello precedente, il questionario è strutturato in quattro sezioni così intitolate, con scopi d'indagine leggermente diversi: *profilo dell'intervistato, conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia, conoscenze specifiche sul tema delle costruzioni in paglia, direzioni future: verso un mondo più green?*.

La prima sezione *profilo dell'intervistato* è composta da quattro domande volte a conoscere meglio l'interlocutore dal punto di vista lavorativo. Le domande sono:

- 1. Età;
- 2. Professione;
- 3. Da quanti anni svolge la sua professione?.

La seconda sezione *conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia* è composta da tre domande ed è volta ad approcciarsi genericamente al tema delle costruzioni in paglia per capire, sinteticamente, se l'intervistato è competente. Le domande sono:

- 4. Ha mai sentito parlare di costruzioni/ristrutturazioni in paglia?;
- 5. Se sì, dove?;
- 6. Quanto si ritiene competente in merito?.

La terza sezione *conoscenze specifiche sul tema delle costruzioni in paglia* è composta da quattro domande che, entrando nel vivo del tema, hanno l'obiettivo di comprendere la preparazione dell'intervistato e l'eventuale impiego della paglia in ambito professionale. Le domande sono:

- 7. Ha mai utilizzato la paglia in un suo progetto?;
- 8. Se sì, in che modo?;
- 9. Se no, vorrebbe farlo in futuro?;
- 10. In quali ambiti si considera più o meno preparato? (disponibilità/reperibilità della paglia, differenze tra i tipi di paglia, filiera produttiva della paglia, normativa, conoscenza della paglia dal punto di vista prestazionale, conoscenza di edifici realizzati in paglia, soluzioni tecnologiche per nuove costruzioni, soluzioni tecnologiche per interventi di riqualificazione, conoscenza delle problematiche/punti di forza dei cantieri in paglia, conoscenza delle problematiche/punti di forza dei cantieri in paglia, costi).

La quarta e ultima sezione *direzioni future: verso un mondo più green?* si concentra su temi più generici rispetto alle due sezioni precedenti. Lo scopo è comprendere il punto di vista dei professionisti rispetto l'impiego della paglia in architettura e se la paglia potrà far parte in modo più significativo del panorama edilizio futuro. Le domande sono:

- 11. Qual è la sua posizione rispetto all'uso della paglia nelle costruzioni?;
- 12. Vorrebbe migliorare le sue attuali conoscenze in tale ambito?;
- 13. Secondo lei, come si sta muovendo il settore delle costruzioni oggi?.

Risultati

Di seguito sono riportati i risultati principali emersi a seguito delle interviste.

Per quanto riguarda la prima sezione *profilo dell'intervistato*:

- La maggior parte degli intervistati (58,1%) si colloca in una fascia d'età compresa tra i 40 e i 65 anni;
- Quasi tutti gli intervistati (80,6%) sono architetti;
- Una buona parte degli intervistati (54,8%) svolge la propria professione da più di 15 anni, mentre un'altra parte importante (32,3%) da 1-5 anni.

Per quanto riguarda la seconda sezione *conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia*:

- Quasi tutti gli intervistati (87,1%) hanno già sentito parlare di costruzioni in paglia soprattutto in ambito lavorativo, in ambito accademico e durante eventi, corsi o esposizioni;
- La maggioranza degli intervistati (87,1%) si ritiene poco competente in merito all'impiego della paglia in architettura.

Per quanto riguarda la terza sezione *conoscenze specifiche sul tema delle costruzioni in paglia*:

- Quasi tutti (96,8%) non hanno mai utilizzato la paglia in un loro progetto, ma una buona parte di essi (64,4%) vorrebbe farlo in futuro;
- Gli ambiti in cui gli intervistati si considerano maggiormente preparati sono la conoscenza delle prestazioni della paglia, la conoscenza di edifici realizzati in paglia e la conoscenza di soluzioni tecnologiche impiegate negli edifici in paglia. Mentre si considerano meno preparati rispetto alla normativa, ai costi, ai tipi di paglia, alla filiera produttiva della paglia e ai pro e i contro dei cantieri di edifici realizzati in paglia e degli edifici stessi.

Per quanto riguarda la quarta sezione *direzioni future: verso un mondo più green?*:

- Solo una piccola parte degli intervistati (6,4%) si dichiara sfavorevole nei confronti dell'impiego della paglia in architettura;
- Secondo la maggior parte degli intervistati (83,9%) il settore delle

costruzioni scoraggia l'impiego di materiali naturali principalmente a causa della scarsa informazione sia da parte dei committenti che da parte degli esperti del settore; Tra gli altri motivi emergono la sfiducia che committenti e professionisti ripongono nei materiali da costruzione naturali, la scarsa pubblicizzazione di questi ultimi e un disinteresse diffuso nei confronti della questione ambientale.

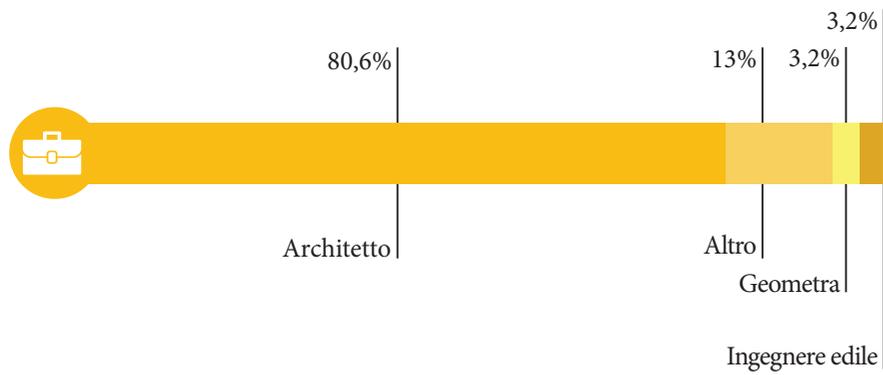
- La restante parte degli intervistati (16,1%) crede che il settore delle costruzioni stia incoraggiando l'impiego dei materiali naturali in primo luogo per promuovere la conoscenza di nuovi sistemi tecnologici e di materiali alternativi, poi per promuovere l'uso consapevole delle risorse e per migliorare la salubrità degli ambienti interni.

Profilo dell'intervistato:

1. Età



2. Professione

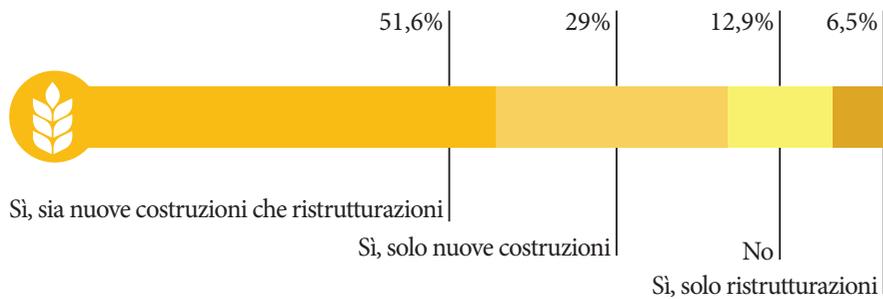


3. Da quanti anni svolge la sua professione?

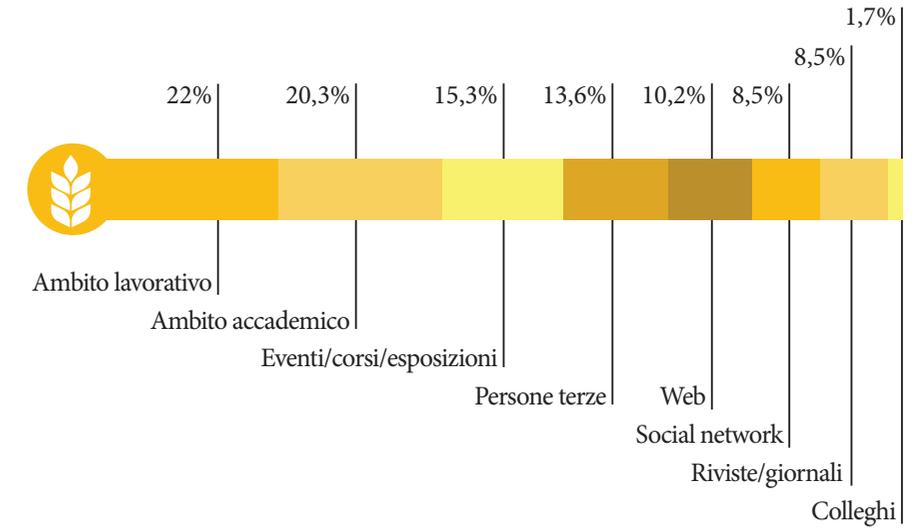


Conoscenze generiche sul tema delle costruzioni in paglia

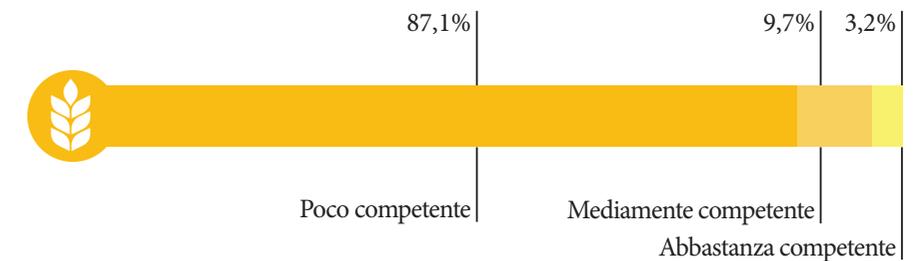
4. Ha mai sentito parlare di costruzioni/ristrutturazioni in paglia?



5. Se sì, dove?

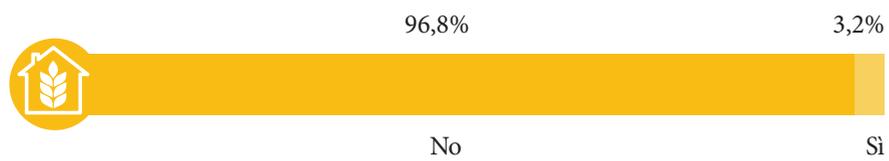


6. Quanto si ritiene competente in merito?

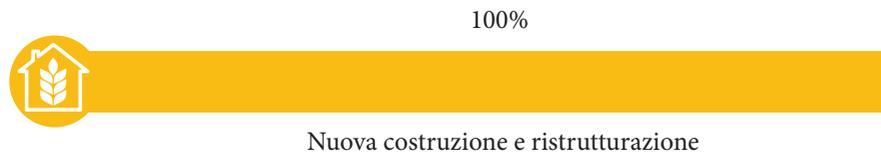


Conoscenze specifiche sul tema delle costruzioni in paglia

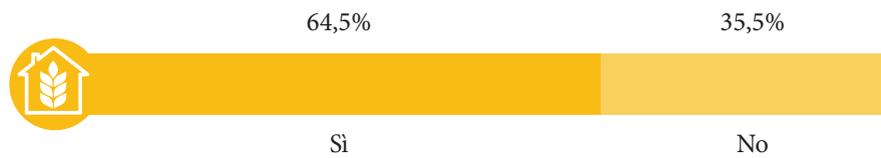
7. Ha mai utilizzato la paglia in un suo progetto?



8. Se sì, in che modo?

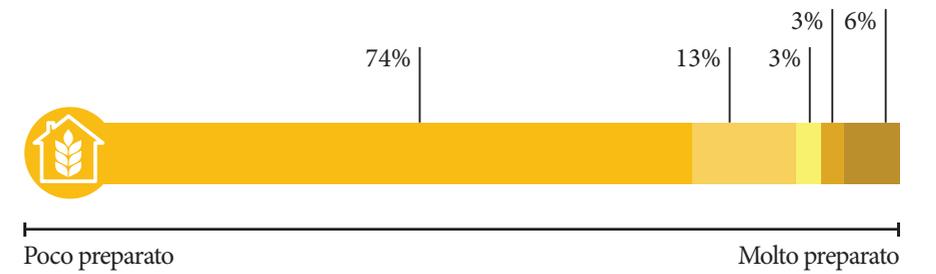


9. Se no, vorrebbe farlo in futuro?

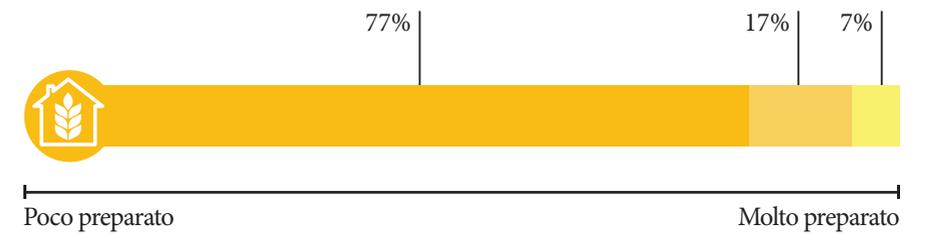


10. In quali ambiti si considera più o meno preparato?

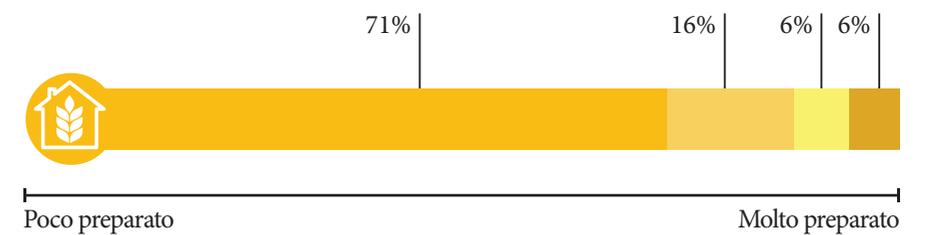
Disponibilità/reperibilità della paglia



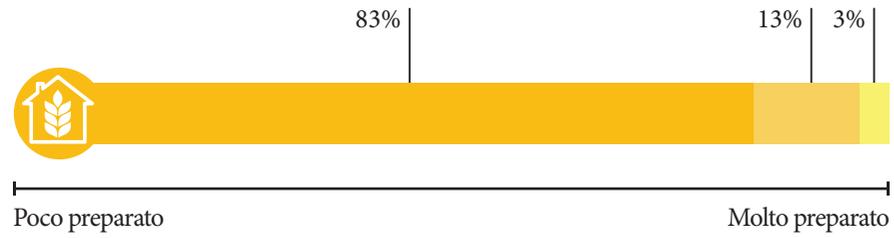
Differenze tra i tipi di paglia



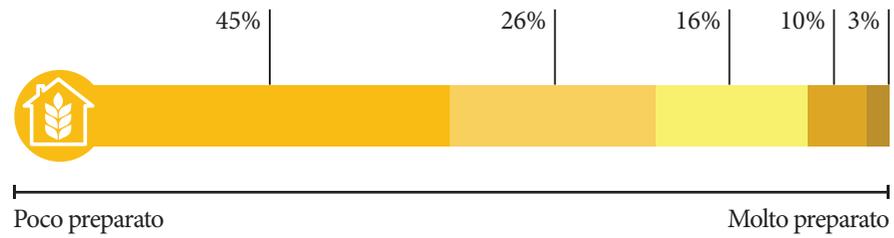
Filiera produttiva della paglia



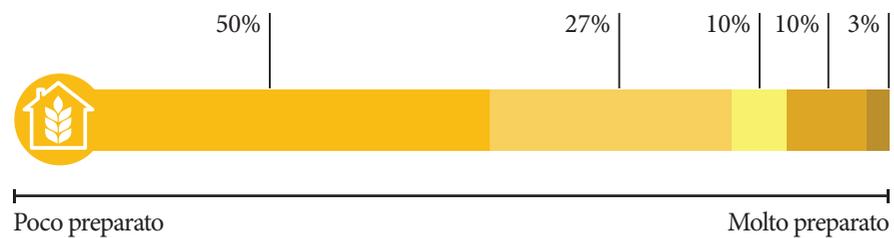
Normativa



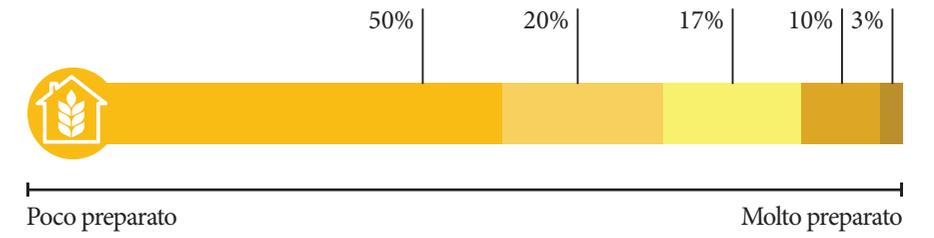
Conoscenza della paglia dal punto di vista prestazionale



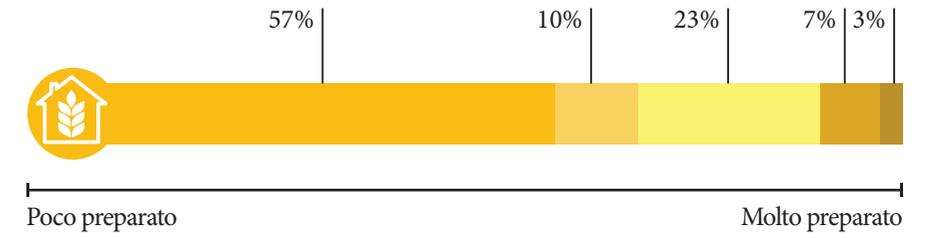
Conoscenza di edifici realizzati in paglia



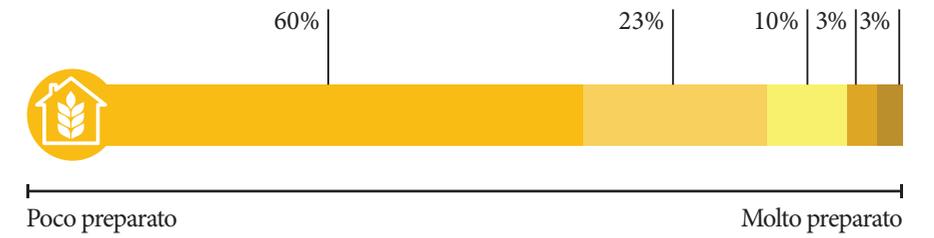
Soluzioni tecnologiche per nuove costruzioni



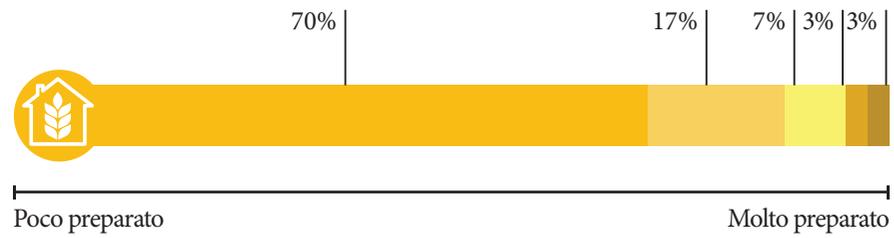
Soluzioni tecnologiche per interventi di riqualificazione



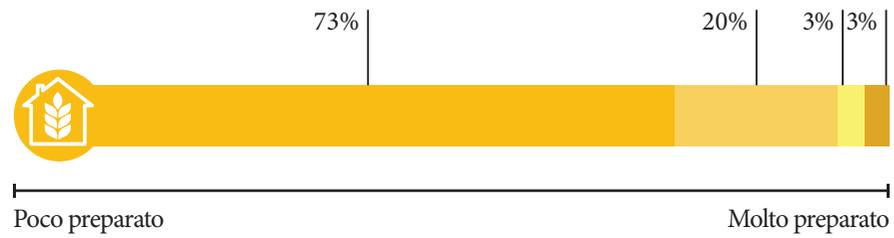
Conoscenza delle problematiche/punti di forza dei cantieri in paglia



Conoscenza delle problematiche/punti di forza degli edifici in paglia



Costi

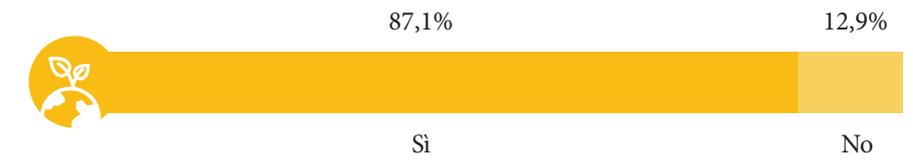


Direzioni future: verso un mondo più green? :

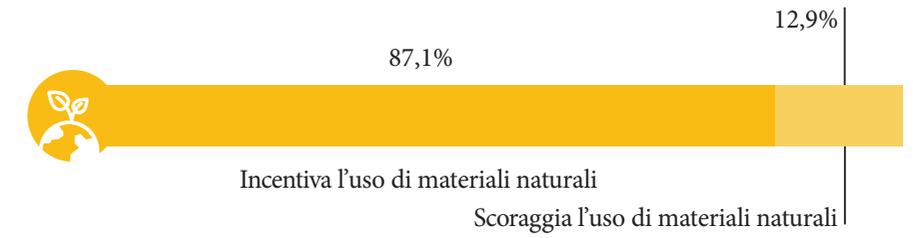
11. Qual è la sua posizione rispetto all'uso della paglia nelle costruzioni?



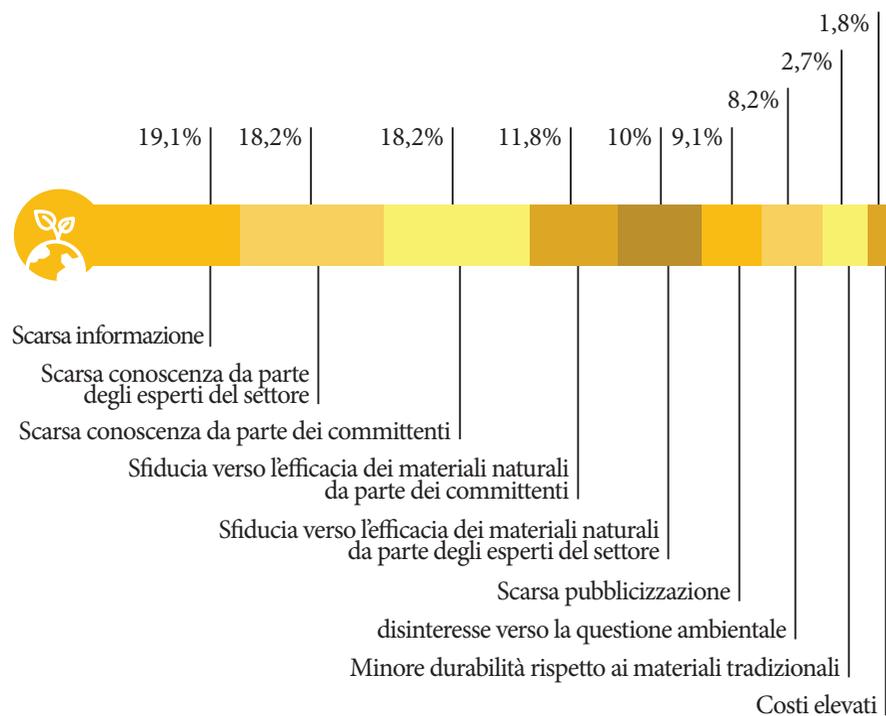
12. Vorrebbe migliorare le sue attuali conoscenze in tale ambito?



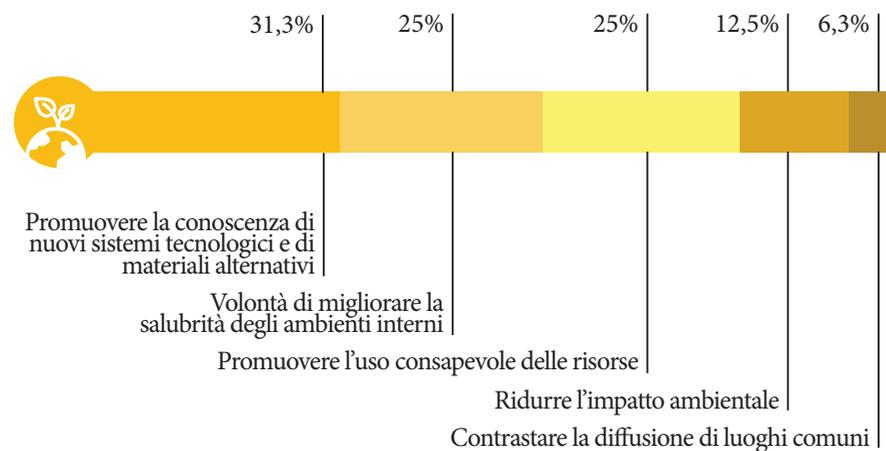
13. Secondo lei, come si sta muovendo il settore delle costruzioni oggi?



14. Perché, secondo lei, il settore delle costruzioni scoraggia l'uso di materiali naturali?



15. Perché, secondo lei, il settore delle costruzioni incoraggia l'uso di materiali naturali?



Conclusioni

L'analisi dei dati raccolti tramite la somministrazione del questionario, ha prodotto, anche in questo caso, delle riflessioni di seguito riportate. Quello che emerge è uno scenario non del tutto negativo perché quasi tutti gli intervistati hanno già sentito parlare di costruzioni in paglia anche se non hanno mai applicato questa tecnica costruttiva in un loro progetto. Inoltre, la maggior parte degli intervistati si ritiene poco competente in merito ma favorevole all'impiego di questo materiale in architettura. Sarebbe quindi utile prevedere dei momenti di formazione in modo da incoraggiare e avvicinare sempre più professionisti al mondo della paglia.

Emerge, inoltre, che la maggior parte degli intervistati risulta abbastanza preparata per quanto riguarda le conoscenze accademiche ma impreparata per quello che concerne i risvolti pratici. Per cui è evidente che c'è una conoscenza di base, da incrementare se si vuole provare a promuovere la diffusione di questa tecnica costruttiva.

L'opinione degli esperti del settore: interviste dirette

Strutturazione delle interviste

L'indagine è stata sottoposta a cinque professionisti (sia singoli che titolari di studi di architettura) tramite intervista diretta e in un periodo di tempo compreso tra il 21 ottobre 2019 e il 22 novembre 2019. È stata sottoposta la stessa intervista ad ogni intervistato e quest'ultima, composta da undici domande, tocca vari aspetti. Rispetto ai questionari precedenti, questa si presenta più specifica e focalizzata sul tema dell'uso della paglia negli interventi di riqualificazione. Si passa da tematiche più generali come la diffusione della paglia in Italia e in Europa fino a toccare aspetti più tecnici come la cantierizzazione, le soluzioni tecnologiche e gli aspetti economici per terminare con gli aspetti soggettivi come il rapporto con la committenza e le simulazioni termoigrometriche effettuate attraverso l'uso dei software. Le domande sottoposte sono le seguenti:

- 1. Quanto è diffuso in Italia l'uso di cappotti in paglia? Se non lo è molto, perché secondo lei? Ha mai usato la paglia in un intervento di riqualificazione?

- 2. In riferimento allo scenario Europeo della riqualificazione in paglia, dove si colloca l'Italia?

- 3. Il ciclo di raccolta della paglia influenza in qualche modo la realizzazione di un progetto o la predisposizione del cliente verso questo tipo di intervento?

Se sì, come?

- 4. Quali trasformazioni deve subire la paglia dal momento in cui viene raccolta fino a quando non viene posata?

Lei che tipo di paglia usa e perché?

- 5. Di fronte ad un intervento di riqualificazione Lei consiglia ai suoi clienti di utilizzare la paglia?

Perché? Quali sono i pro e i contro?

- 6. Dal punto di vista tecnologico, quali sono le possibili soluzioni per coibentare un edificio esistente utilizzando la paglia?

- 7. In riferimento al rapporto con la committenza, quali sono i pregiudizi e i "falsi miti" che ha dovuto sfatare?

- 8. Dal punto di vista tecnologico e cantieristico, quali sono le maggiori criticità che si incontrano negli interventi di riqualificazione e come si risolvono?

Quali accorgimenti bisogna utilizzare?

- 9. Dal punto di vista delle prestazioni sul lungo periodo, ha mai monitorato un suo intervento di riqualificazione nel tempo?

Se sì, quali sono le criticità riscontrate?

Quali sono le differenze tra l'impiego della paglia piuttosto che di materiali tradizionali?

- 10. Dal punto di vista economico, quali sono le differenze tra progettare un intervento di riqualificazione con la paglia e con materiali tradizionali?

- 11. Per simulare il comportamento termico estivo ed invernale che software usa?

Dove reperisce i dati della paglia da inserire nel software (es. conducibilità, densità, calore specifico)?

Attraverso quest'indagine si vuole analizzare in modo più accurato il tema della paglia impiegata in architettura, cercando di entrare nel vivo dell'argomento proprio attraverso il confronto diretto con gli esperti del settore.

Gli architetti ai quali è stata sottoposta l'intervista sono:

- Filippo Caggiano, fa parte dello studio di architettura *GreenThink naturalmente paglia*, si occupa da più di dieci anni di progettazione e realizzazione di edifici con materiali naturali. Inoltre, è esperto di medicina ambientale e di benessere abitativo;
- Alessandro Fassi, esperto di architettura bioclimatica, opera sul territorio torinese da diversi anni;
- Maurizio Macrì e Stefania Mancuso, titolari dello studio di architettura *Macrì-Mancuso*, appassionati al tema della paglia già dai tempi dell'università e attualmente molto attivi sul territorio torinese;
- Nicola Preti, si occupa di progettazione e realizzazione di edifici con materiali naturali, è attivo sul territorio Veronese dal 2006.
- Alessandro Veglio, titolare insieme ad Erica Castagno dello studio *Case di paglia* con sede ad Alba, si occupano di bio-architettura progettando e realizzando edifici in paglia, legno e terra cruda.

Intervista all'arch. Filippo Caggiano



- 1. Quanto è diffuso in Italia l'uso di cappotti in paglia? Se non lo è molto, perché secondo lei? Ha mai usato la paglia in un intervento di riqualificazione?**

La diffusione è limitata a pochi esempi di sperimentazione, e per pochi intendo probabilmente inferiori ad un centinaio. Non è diffuso perché è una tecnica che richiede un livello di competenza che non caratterizza il profilo dell'artigiano classico che normalmente si muove sulla base di limitati periodi di apprendimento e necessità di eseguire un lavoro con velocità. Quindi il motivo è legato da un lato al fatto che l'artigiano è sempre meno eccellenza artigiana e sempre più un esecutore, la specializzazione non esiste e pochi specialisti significa pochi lavori. Poi c'è anche la questione normativa: la paglia è difficilmente normabile.

Mi è capitato di usarla in almeno una decina di progetti di riqualificazione.



- 2. In riferimento allo scenario Europeo della riqualificazione in paglia, dove si colloca l'Italia?**

La diffusione è limitata a pochi esempi di sperimentazione, e per pochi intendo probabilmente inferiori ad un centinaio. Non è diffuso perché è una tecnica che richiede un livello di competenza che non caratterizza il profilo dell'artigiano classico che normalmente si muove sulla base di limitati periodi di apprendimento e necessità di eseguire un lavoro con velocità. Quindi il motivo è legato da un lato al fatto che l'artigiano è sempre meno eccellenza artigiana e sempre più un esecutore, la specializzazione non esiste e pochi specialisti significa pochi lavori. Poi c'è anche la questione normativa: la paglia è difficilmente normabile.

Mi è capitato di usarla in almeno una decina di progetti di riqualificazione.



3. Il ciclo di raccolta della paglia influenza in qualche modo la realizzazione di un progetto o la predisposizione del cliente verso questo tipo di intervento?

No, nel senso che normalmente i clienti sono abbastanza curiosi, la paglia è un elemento che attira. Io dico sempre che noi siamo chimicamente attratti da qualcosa, dalla scelta di un oggetto alla scelta di un amico, a colpo d'occhio pensi che quell'oggetto/amico abbia delle caratteristiche che ti predispongono a volerlo approfondire. Quindi posso dire che un cliente orientato verso i materiali naturali trova la paglia sempre molto interessante.



4. Quali trasformazioni deve subire la paglia dal momento in cui viene raccolta fino a quando non viene posata? Lei che tipo di paglia usa e perché?

La paglia nel momento in cui si raccoglie viene portata dalla condizione di inconsistenza al mattone di paglia. Più che trasformazione la definirei una riconfigurazione geometrica e poi da lì in avanti nulla è trasformato e sarebbe un errore farlo. Quindi diciamo che la paglia non necessita di particolari trasformazioni.

Io utilizzo la paglia che è più vicina al sito, è sbagliato ragionare sotto un profilo di elevata distanza chilometrica. Quindi se mi trovo a progettare nella zona di Ivrea cercherò un produttore che sia collocato ad una distanza massima di 15-20 km rispetto al sito, e quindi userò una paglia di grano duro. Se sono a Pavia o Vercelli userò una paglia di riso. Se mi trovo in alta montagna userò una paglia di segale.

Delle differenze tra i diversi tipi di cereali ci sono, ma facciamo un esempio: se utilizzo una paglia che ha delle caratteristiche di resisten-

za all'acqua migliori con come una paglia di riso e piove per due settimane, non riesco ad aumentare la durabilità del muro utilizzando la paglia di riso.

La paglia è un componente del progetto, non è il fine. Quindi l'obiettivo non è realizzare un edificio in paglia ma un edificio duraturo e la paglia nelle sue caratteristiche anche differenti, può essere collocata in maniera opportuna o non opportuna in relazione a quanto è critica la gestione della stratigrafia della parete.

Infine, per dare una risposta, le differenze ci sono ma sono molto più importanti le differenze che metti nel progetto. Il fatto di riuscire ad utilizzare una paglia che sia quanto più vicina possibile dà una risposta matura al progetto. L'equilibrio dovrebbe essere tarato in base alla distanza chilometrica e quando si sa quale paglia si può ottenere si decide di individuare delle soluzioni di progetto che siano in sicurezza rispetto al tipo di prodotto che si è utilizzato.



5. Di fronte ad un intervento di riqualificazione Lei consiglia ai suoi clienti di utilizzare la paglia? Perché? Quali sono i pro e i contro?

Sì, ma più che consigliare cerchiamo di far percepire quali soluzioni potrebbero essere definite utilizzando la paglia. Secondo me il progettista non può suggerire ma deve esplicitare quelle che sono delle soluzioni alternative. Io continuo a dire che è una soluzione che trovo eccezionale, ma non la suggerisco pur conoscendone tutti gli aspetti positivi perché è come un tessuto, come la sensazione di prurito che può provocare la lana, che è soggettiva. Quindi lo stesso vale per i materiali, c'è un'interazione che noi cerchiamo di stimolare, poi sarà il cliente a decidere.

I pro sono sicuramente gli aspetti connessi alla riciclabilità e alla compatibilità biologica che per me è la capacità di un materiale di sostenere all'interno di uno spazio confinato. Poi ci sono aspetti legati alla sostenibilità intesa come elevata efficienza, ad un LCA molto ridotta, al riportare l'economia sul territorio perché utilizzare un prodotto che

arriva da 15-20 km di distanza significa che stai investendo dei soldi sostenendo l'economia locale.

I contro sono legati al fatto che non è un materiale semplice da utilizzare, è una “primadonna” quindi va accudita, custodita e gestita con attenzione e questo non è sempre compreso da tutti i progettisti.



6. Dal punto di vista tecnologico, quali sono le possibili soluzioni per coibentare un edificio esistente utilizzando la paglia?

Si possono realizzare delle murature ex-novo, dei cappotti e delle murature in integrazione con le pareti preesistenti. In quest'ultimo caso si costruisce un nuovo muro che sia vicino o addirittura in adesione con quello esistente realizzando una specie di contromuratura in paglia: si realizzano dei telai leggeri che si ancorano ai solai e permettono di legare anche le murature preesistenti in laterizio che devono essere stabilizzate. È una tecnica a cassone applicata ad una muratura. Le balle di paglia all'interno del cassone sono compresse e quindi bloccate all'interno di esso.



7. In riferimento al rapporto con la committenza, quali sono i pregiudizi e i “falsi miti” che ha dovuto sfatare?

I costi bassi, perché per anni chi ha fatto promozione della paglia l'ha spinta come una soluzione a basso costo. Posso realizzare qualsiasi edificio facendo economia, poi semplicemente mi prendo le conseguenze: basso costo significa bassa qualità e bassa qualità su un edificio sensibile vuol dire portarlo verso delle criticità che sono decisamente più condizionanti rispetto alla bassa qualità di un edificio tradizionale realizzato in laterizio dove al massimo vi si forma una muffa.



8. Dal punto di vista tecnologico e cantieristico, quali sono le maggiori criticità che si incontrano negli interventi di riqualificazioni e come si risolvono?

È come quando un malato arriva a farsi fare una diagnosi. La difficoltà principale dal punto di vista tecnologico è studiare bene l'edificio sul quale intervenire: una buona analisi che richiede tante ore e disponibilità di fare indagini invasive demolendo porzioni di solaio o parete per vedere quello di cui è effettivamente composto l'edificio. Se hai fatto una buona analisi iniziale le soluzioni di progetto sono compatibili e quindi la fase esecutiva viaggia in modo lineare. Le difficoltà, secondo me, sono risolvibili nel momento in cui ci si prende il tempo necessario per diagnosticare tutte le patologie dell'edificio, perché poi l'intervento di riqualificazione deve risolverle tutte.

Diversamente, si incontrano difficoltà in cantiere soprattutto quando le manovalanze non hanno uno storico.

Io direi che il segreto per non avere problemi è lavorare bene nella diagnosi, nel rilevamento del preesistente e nello sviluppo di dettagli che siano frutto non solo di un'analisi tecnica ma bensì frutto di una verifica operativa in sito.



9. Dal punto di vista delle prestazioni sul lungo periodo, ha mai monitorato un suo intervento di riqualificazione nel tempo?

Se sì, quali sono le criticità riscontrate?

Quali sono le differenze tra l'impiego della paglia piuttosto che di materiali tradizionali?

Come monitoraggio dal punto di vista qualitativo sì, nel senso che ci sono dei riscontri nei consumi, nelle condizioni di umidità e se ci fossero dei problemi a distanza di 10 anni (dai primi interventi di riqualificazione realizzati) si vedrebbero. Monitoraggio nel senso

stretto del termine significa avere delle sonde e controllare dopo 10 anni come è cambiato l'umidità nel materiale, etc.. però sono molto costose.



10. Dal punto di vista economico, quali sono le differenze tra progettare un intervento di riqualificazione con la paglia e con materiali tradizionali?

Innanzitutto, nel convenzionale l'obiettivo è costruire. Mentre l'obiettivo di chi vuole costruire un edificio in paglia è raggiungere un certo livello di comfort e salubrità all'interno dello spazio. Questa è la principale differenza sotto l'aspetto qualitativo.

Dal punto di vista economico, se fai un buon progetto non c'è nessuna differenza di costi.

Secondo me la differenza non c'è sulla base del materiale, c'è sulla base dell'approccio di un protocollo che vuol dire disegnare i particolari, fare delle simulazioni con software più evoluti di quelli che normalmente si usano. Diciamo che rimane questo *gap* colmabile in maniera differente in base al progetto, la paglia non genera costi in più di progettazione.



11. Per simulare il comportamento termico estivo ed invernale che software usa?

Dove reperisce i dati della paglia da inserire nel software (es. conducibilità, densità, calore specifico)?

Usiamo diversi software. Usiamo software di tipo commerciale come *Thermus*, *Termolog* e *Edilclima*, e software più complessi come *WUFI* ed *Energyplus*.

I database arrivano da varie fonti che possono essere quelle normative, cioè abbiamo dati che arrivano da paesi come la Germania, Austria o Stati Uniti, dall'agenzia *Casaclima* e dagli abachi dei materiali da loro definiti. Usiamo però sempre dei parametri di peggioramento.

Inoltre, ci sono software come *WUFI* che mettono a disposizione all'interno del software dei dati già operativi per l'utilizzo della paglia. Ci sono anche certificazioni di enti o di facoltà che vengono richiamati per l'aspetto di calcolo termico ma anche acustico che di volta in volta andiamo a riutilizzare.

Intervista all'arch. Alessandro Fassi



1. Quanto è diffuso in Italia l'uso di cappotti in paglia? Se non lo è molto, perché secondo lei? Ha mai usato la paglia in un intervento di riqualificazione?

Io non sono a conoscenza di altri esempi oltre al caso del mio progetto di cappotto in paglia a Cinzano. Sicuramente uno dei lati più preoccupanti che ne ostacola la diffusione può essere lo spessore, anche se si può ovviare utilizzando alcune accortezze dal punto di vista progettuale. Nel caso di Cinzano per esempio ho lavorato molto sulla forma delle aperture perché raddoppiando lo spessore della muratura a seguito dell'intervento, ho eseguito le verifiche per la luce naturale e ho visto che avevo dimezzato il fattore medio di luce diurna.

Gli edifici storici o in quelli in cui c'è da recuperare potrebbero essere degli edifici che non hanno delle grandissime aperture, un cappotto di quel tipo deve essere valutato.

Ho usato la paglia soltanto nell'intervento di Cinzano.



2. In riferimento allo scenario Europeo della riqualificazione in paglia, dove si colloca l'Italia?

Secondo me in Italia siamo indietro, se ne parla e ho la sensazione che ci sia interesse da parte dei privati però nella fattispecie non vedo un aumentare di casi reali. Bisogna essere preparati, non si può pensare di sostituire la paglia con un altro materiale perché ovviamente ha delle dimensioni, richiede un certo trattamento e quindi non è così semplice.



3. Il ciclo di raccolta della paglia influenza in qualche modo la realizzazione di un progetto o la predisposizione del cliente verso questo tipo di intervento?

La cosa che ho notato negli anni è che sta diventando sempre più difficile trovare la paglia perché si stanno diffondendo sempre più le rotoballe.

Ho visto che se i committenti sono interessati riescono a procurarla (ovviamente quella dell'estate precedente), il problema è stoccarla perché necessita di molto spazio. Oppure i committenti prenotano agli agricoltori la paglia dell'estate successiva.



4. Quali trasformazioni deve subire la paglia dal momento in cui viene raccolta fino a quando non viene posata? Lei che tipo di paglia usa e perché?

Possibilmente nessuna.

Ho usato paglia di orzo e frumento in base alla disponibilità dell'intorno, ma in generale non fa differenza.



5. Di fronte ad un intervento di riqualificazione Lei consiglia ai suoi clienti di utilizzare la paglia? Perché? Quali sono i pro e i contro?

Innanzitutto, il cliente deve essere accompagnato in fase progettuale, non si può consigliarla a chiunque.

Tra i pro c'è il fatto che è un materiale di scarto e che ha ancora dei costi bassi. Inoltre, per com'è fatto è un materiale che ha spessori considerevoli e di conseguenza un notevole isolamento termico. È poi un supporto facilmente intonacabile per cui rispetto ad altri isolanti più rigidi che necessitano di essere rasati con intonachino è più facile da utilizzare. Secondo me è molto più interessante in certi contesti perché permette di assumere delle forme più scultoree, anche se in un mondo modernista come il nostro è raro che siano richieste. Ecco perché credo che sia un tipo di costruzione più opportuno in ambito rurale piuttosto che cittadino.



6. Dal punto di vista tecnologico, quali sono le possibili soluzioni per coibentare un edificio esistente utilizzando la paglia?

Dipende molto dall'altezza da coprire. Tendo a fare un cordolo di fondazione e per esempio nel caso di Cinzano il cordolo ha assunto la doppia funzione: la prima è quella di piede rigido a creare un cordolo di coronamento della muratura perché c'era una tendenza allo scivolamento e la seconda era quella di sollevare la paglia dall'umidità del terreno. Per tenere i corsi di balle saldi gli uni sugli altri, sempre a Cinzano ho provato varie soluzioni. Ho utilizzato la cannetta di bambù ma non andava molto bene perché è molto liscia e alla fine ho usato il listello 4x4 da tetti che essendo a profilo quadrato fa più resistenza ad introdursi all'interno della balla quindi resiste meglio allo sfilamento. Quindi a Cinzano erano stati fatti dei listelli da un metro in modo tale da prendere due corsi di balle sfalsati e ai quali era stata creata una punta. Secondo me è la cosa più semplice, lo rifarei e sicuramente non userei i tondini di ferro.

Dal punto di vista dell'ancoraggio alla facciata e prendendo come esempio il caso di Cinzano, a metà altezza ho creato un cordolo di legno poggiato sopra il paramento in paglia che ho ancorato alla muratura tramite dei tasselli e ho tirantato anche le fondazioni. Poi da lì sono ripartito e arrivato fino alla copertura. Quindi ho praticamente diviso in due la muratura in paglia: una è compresa tra il tetto e il cordolo intermedio e l'altra tra il cordolo intermedio e il cordolo di fondazione.

Inoltre, ho sentito di colleghi che hanno tassellato le balle di paglia, ma penso che dei tasselli profondi 35-40 cm diventino molto impegnativi e costosi.



7. In riferimento al rapporto con la committenza, quali sono i pregiudizi e i "falsi miti" che ha dovuto sfatare?

Prima di tutto bisogna cercare di capire con chi si ha a che fare, se la

persona è aperta gli si può proporre, al contrario non ha senso nemmeno proporlo. È molto importante far vedere gli aspetti economici poiché quelli possono anche far cambiare idea alle persone. Non è una cosa per tutti secondo me.

Per la mia esperienza, le persone più aperte non avevano dei pregiudizi, anche perché per proporre delle cose bisogna creare un rapporto di fiducia e se il cliente si fida capisce che non stai improvvisando.



8. Dal punto di vista tecnologico e cantieristico, quali sono le maggiori criticità che si incontrano negli interventi di riqualificazioni e come si risolvono?

La velocità di posa è la maggiore criticità. Bisogna essere molto rapidi a posarlo perché se non si copre e si bagna, la parte interessata deve essere rimossa. Quindi secondo me l'unica accortezza è questa.

9. Dal punto di vista delle prestazioni sul lungo periodo, ha mai monitorato un suo intervento di riqualificazione nel tempo?



Se sì, quali sono le criticità riscontrate?

Quali sono le differenze tra l'impiego della paglia piuttosto che di materiali tradizionali?

L'unica cosa che ho fatto è andare a vedere l'intervento di Cinzano che ormai ha compiuto quindici anni. Quando sono andato a vederlo sono rimasto entusiasta: l'intonaco non aveva crepe.

Una criticità riscontrata è stata in fase di costruzione perché c'è stato un assestamento verticale e quindi è necessario prevederlo mettendo in pre-compressione le balle di paglia e in modo che venga meno questo fenomeno.

La differenza rispetto all'uso di materiali tradizionali è che è un materiale molto vicino all'uomo e il cantiere è molto più partecipativo ed entusiasmante.



10. Dal punto di vista economico, quali sono le differenze tra progettare un intervento di riqualificazione con la paglia e con materiali tradizionali?

Non c'è una grande differenza perché in un edificio la parte di isolamento termico è solo una piccola porzione. Il risparmio secondo me va guardato più che altro in una visione energetica nel tempo. Il fatto di portare una casa ad una classe energetica così bassa tramite il cappotto in paglia va considerato bene, non bisogna guardare solo il risparmio nel costo, che è limitato, ma il risparmio sulla bolletta che si ha nel corso del tempo.



11. Per simulare il comportamento termico estivo ed invernale che software usa?

Dove reperisce i dati della paglia da inserire nel software (es. conducibilità, densità, calore specifico)?

Dipende. Ho usato *PAN* e ora sto usando quelli della *Rothoblaas*. Per la conducibilità ho studiato la letteratura negli anni e poi ho applicato un peggioramento. Per esempio io uso 0,06 W/mK che è un valore una volta e mezzo peggiore rispetto a una fibra di legno o alla canapa.

Intervista agli architetti Maurizio Macrì e Stefania Mancuso (Studio Macrì-Mancuso)



1. Quanto è diffuso in Italia l'uso di cappotti in paglia? Se non lo è molto, perché secondo lei?

Ha mai usato la paglia in un intervento di riqualificazione?

Non lo è molto e le motivazioni principali sono molteplici. In primis lo spessore: per creare una struttura solida e resistente da mettere in opera bisogna creare un reticolo in legno e sistemare la paglia, questo avrà una certa profondità, e va ad incidere su un discorso di collocazione. Per esempio, in un condominio tutti dovrebbero essere d'accordo, bisogna controllare se gli edifici limitrofi sono adiacenti e poi bisogna verificare il discorso relativo alla viabilità e quindi alle distanze dettate dalla normativa vigente. Per quanto riguarda invece gli edifici isolati chiaramente è molto più semplice.

L'altro aspetto che riguarda sempre lo spessore: questo strato isolante ha uno spessore sicuramente maggiore rispetto ad un altro tipo di prodotto che può essere più o meno naturale. Il fatto di avere uno spessore maggiore riduce la luce in entrata, che è quindi uno svantaggio. Inoltre, a livello di costi la struttura da creare per contenere la paglia non è vantaggiosa.

La vera risposta, del perché non è tanto utilizzata, è che la paglia utilizzata come cappottatura esterna può generare dei benefici che riguardano puramente l'aspetto economico legato al risparmio energetico. Su questa economia si può agire anche con altri materiali, sempre naturali, avendo a disposizione sul mercato diverse soluzioni che danno pari performance con sistemi tecnologicamente anche più definiti.

Il vero limite è non avere un sistema tecnologico ingegnerizzato per costruire un cappotto. Se si trovasse un sistema ingegnerizzato, quindi facile e veloce da montare, tutto sommato, a parità di costo, la componente ambientale potrebbe ancora avere un suo peso.

Invece oggi, i cappotti che vengono realizzati sono sempre frutto di una forte manodopera. Quindi non si riesce a trovare l'equilibrio tra

la soluzione tecnologica e l'economia del sistema. Si è avuto maggiore successo laddove si è intervenuti con l'autocostruzione perché si abbattano i costi della manodopera e allora si riesce ad avere un grosso vantaggio che è competitivo rispetto ad altri sistemi con un più alto contenuto tecnologico che non si prestano alle tecniche di autocostruzione.

Abbiamo usato la paglia recentemente in un intervento a Cesana.



2. In riferimento allo scenario Europeo della riqualificazione in paglia, dove si colloca l'Italia?

In valore assoluto nel mondo della paglia non siamo così tanto indietro.

Sicuramente in testa ad un'ipotetica classifica troviamo la Francia e la Germania che a livello di prassi stanno lavorando in maniera molto decisa.

L'Inghilterra ha fatto parecchio ma, a mio avviso, non compare il livello qualitativo delle altre due nazioni.

La Svizzera ha lavorato molto con le jumbo bales perché ha avuto come guida l'architetto Schmidt.

Poi ci siamo noi, seguiti da Spagna e paesi dell'Est, che stanno sperimentando a livello di autocostruzione.

L'Italia ha questo giusto compromesso tra la tecnologia e un'architettura di qualità con un'attenzione al risparmio energetico, al particolare. La pecca degli Italiani è che non riescono a fare gruppo, quindi ognuno lavora sul suo pezzettino con dignità ma non si riesce a fare gruppo e a definire delle linee guida, dei sistemi e dei metodi condivisi.



3. Il ciclo di raccolta della paglia influenza in qualche modo la realizzazione di un progetto o la predisposizione del cliente verso questo tipo di intervento?

Sì, fa parte della progettualità nel senso che quando segui un progetto

devi tenere il passo e capire quando vorresti cantierizzare e quindi procurarti per tempo e stoccare il materiale. Significa mettere il committente di fronte al fatto che ha fatto una scelta, e il materiale si deve acquistare quindi bisogna pagarlo e stoccarlo per tempo. Oggi siamo abituati al fatto che si può cambiare idea in ogni momento, fino all'ultimo, mentre in questo caso bisogna tenere conto che si è già investito in qualcosa.



4. Quali trasformazioni deve subire la paglia dal momento in cui viene raccolta fino a quando non viene posata? Lei che tipo di paglia usa e perché?

Ci sono due approcci: uno filosofico e l'altro tecnologico.

Su quello filosofico possiamo dire che la paglia di riso è la migliore perché effettivamente è un vero scarto, mentre tutti gli altri comunque rientrano nella circolarità dell'economia. La paglia di riso non ha nessun altro uso che non essere bruciata in campo.

inoltre, la paglia di riso ha l'ulteriore difficoltà della raccolta: si raccoglie in un periodo in cui le piovosità sono molto alte quindi si rischia di perdere molto prodotto perché al momento della raccolta risulta bagnato.

Si parla inoltre di sistemi legati all'essiccamento. Anni fa abbiamo fatto delle valutazioni riguardo agli essiccatoi: tolto che arrivare al cuore della balle per essiccarlo è difficile, sono sistemi molto energivori. Se alla paglia, che ha un'energia grigia pari a zero perché dovrebbe in ogni caso essere raccolta dal campo, aggiungo il costo dell'essiccamento si rischia di inficiare la scelta.

Altro aspetto è legato al trasporto. Se la paglia non è locale il costo ambientale che assorbe il trasporto è decisamente superiore dal vantaggio che ho dallo scegliere una paglia.

Quindi, dal punto di vista pratico, per noi l'ideale è che la paglia sia locale. Per il resto l'importante è che riesca ad assolvere una serie di funzioni. Per esempio, un campo pieno di infestanti non mi interessa, il culmo deve poi essere sufficientemente lungo perché poi se ne ri-

sente in termini di resistenza durante l'assemblaggio.



**5. Di fronte ad un intervento di riqualificazione Lei consiglia ai suoi clienti di utilizzare la paglia?
Perché? Quali sono i pro e i contro?**

Valutiamo di volta in volta. Se vi è una componente di autocostruzione e un interesse da parte del committente sicuramente assecondiamo le sue esigenze, valutiamo se non ci sono criticità dovute a aspetti tecnologici e quindi lo portiamo ad avere un progetto adeguato alle sue richieste.

Nel caso in cui l'intervento ha un'architettura complessa e andrebbe a snaturare le forme, siamo noi i primi a far cambiare strada al committente.

La paglia non è la soluzione, noi la vediamo in questo modo. La amiamo molto ma bisogna vedere se va bene da più punti di vista. Noi cerchiamo sempre di proporla, ma siamo noi i primi a scartarla eventualmente.



6. Dal punto di vista tecnologico, quali sono le possibili soluzioni per coibentare un edificio esistente utilizzando la paglia?

Se hai un'ampia conoscenza del mondo delle costruzioni di volta in volta vai ad adeguare la tecnica costruttiva, soprattutto sulla riqualificazione bisogna analizzare quello che c'è ed in funzione di questo accostare la tecnica più idonea.

Il sistema in balle di paglia è un sistema che non sta in piedi da solo: anche nel cappotto c'è sempre bisogno di vincolare la parete che ha la funzione di isolamento termico all'esistente. Questo vincolo o si realizza con tasselli o con una struttura distanziata tendenzialmente in legno. Questa struttura va studiata dal punto di vista della scansione degli elementi rispetto alle finestre, al solaio e va studiato il modo di inserirvi la balle all'interno.



7. In riferimento al rapporto con la committenza, quali sono i pregiudizi e i "falsi miti" che ha dovuto sfatare?

Noi non convinciamo più nessuno, facciamo divulgazione quindi ci sono momenti informativi che dedichiamo alla collettività. Quando arriva un cliente che vuole costruire una casa in convenzionale dedichiamo del tempo per raccontargli quali sono i vantaggi di una scelta diversa dal convenzionale, ma senza opera di convincimento. Quando le persone che si rivolgono a noi sono predisposte, sono interessate e hanno una certa sensibilità allora, tra tutto, il tasto sul quale si casca è il costo. Si aspettano di pagare un po' meno perché collegano la paglia ad un materiale povero e di conseguenza al basso costo.

Un'altra domanda che ci viene posta riguarda la durabilità dell'opera. A quel punto noi li portiamo a vedere esempi, a vedere la documentazione e testi storici e li tranquillizziamo.



8. Dal punto di vista tecnologico e cantieristico, quali sono le maggiori criticità che si incontrano negli interventi di riqualificazioni e come si risolvono?

Le maggiori difficoltà sono legate allo stoccaggio del materiale per dimensioni e per attaccabilità dagli agenti atmosferici. Bisogna pensare a dove metterla e che probabilmente non riuscirai a stoccarla tutta in cantiere. Quindi bisogna avere un magazzino di stoccaggio (che magari è lo stesso che ti ha consentito di utilizzare la paglia raccolta l'anno prima) che deve essere a breve distanza dal cantiere e pensare di fare più scarichi. Ipotizzando una situazione urbana devo pensare anche alla pulizia: quando arriva lo scarico delle balle inevitabilmente dei residui svolazzano. Inoltre, devo pensare all'infiammabilità, che in cantiere è un problema evidente e può riguardare sia fiamme libere di qualsiasi tipo che atti vandalici, quindi ne vado a stoccare la giusta quantità che userò in tempi abbastanza rapidi. Gli aspetti logistici sono da valutare attentamente.

Mentre un vantaggio è che la balle pesa intorno ai 15-20 kg, quindi

un peso che può affrontare tranquillamente una persona da sola, e poi è lavorabile con attrezzi poco energivori e a basso grado di pericolosità.

Per contro il discorso delle imprese che realizzano è un problema soprattutto per chi si occupa della progettazione: ti impegna di più perché bisogna seguire l'impresa se non è qualificata. L'ideale è avere un'impresa fatta di persone che hai avuto modo di formare, che hanno seguito già altri cantieri, ma ciò non sempre è possibile.

9. Dal punto di vista delle prestazioni sul lungo periodo, ha mai monitorato un suo intervento di riqualificazione nel tempo?



Se sì, quali sono le criticità riscontrate?

Quali sono le differenze tra l'impiego della paglia piuttosto che di materiali tradizionali?

Non abbiamo mai monitorato un intervento nel tempo. Abbiamo solo avuto modo di andare a visitare gli edifici come per esempio quello a Cinzano.



10. Dal punto di vista economico, quali sono le differenze tra progettare un intervento di riqualificazione con la paglia e con materiali tradizionali?

La paglia in sé non ha un costo elevato, ma al costo del materiale bisogna aggiungere quello della manodopera che ha un valore più elevato rispetto a quella necessaria ai materiali tradizionali. I costi si equivalgono, ma molte volte si fa fatica ad andare oltre nella valutazione dei benefici. Infatti, se pesiamo i benefici dal punto di vista energetico c'è poco da fare: il poliuretano vince su tutto. Però i vantaggi sono tanti altri e sono quelli che devono essere pesati. Se questi vantaggi li valuto su un cappotto sono tanti altri e riguardano aspetti di tipo am-

bientale quindi bisogna avere una certa sensibilità. Se ho una nuova costruzione con una stratigrafia monomateriale e ho la possibilità di agire all'interno con un intonaco magari in terra, riesco a percepire la sensazione di benessere che mi fornisce quel materiale e in questo caso i benefici sono decisamente maggiori.



11. Per simulare il comportamento termico estivo ed invernale che software usa?

Dove reperisce i dati della paglia da inserire nel software (es. conducibilità, densità, calore specifico)?

Per fare delle simulazioni in regime dinamico bisognerebbe fare un passo in avanti che ha un costo che oggi come oggi non ci sentiamo di affrontare anche in virtù del fatto che queste simulazioni hanno ancora un alto grado di incertezza, almeno quelle a basso costo. Poi se ci si orienta verso software più spinti come *Transis*, *Energyplus* o *WUFI* si parla di tutt'altro, però anche lì il problema è inserire i dati.

Per quanto riguarda i dati di trasmittanza non abbiamo dubbi, utilizziamo dati da letteratura cioè i dati della *FASBA* che sono stati poi ripresi nelle normative francesi. Sono questi oramai i dati utilizzati sul mercato internazionale che danno delle garanzie di prodotto.

Per esempio per il calore specifico abbiamo dati da letteratura che vanno dai 600 kJ/kgK ai 2000 kJ/kgK.

Per quanto riguarda invece i dati relativi al comportamento estivo, quindi soprattutto la capacità termica, secondo me non ci sono ancora dati attendibili sulla paglia.

Intervista all'arch. Nicola Preti



1. Quanto è diffuso in Italia l'uso di cappotti in paglia?

Se non lo è molto, perché secondo lei?

Ha mai usato la paglia in un intervento di riqualificazione?

Perché i clienti non conoscono questa tecnica costruttiva.

Non ne ho mai realizzato un cappotto in paglia ma ho utilizzato la paglia in un intervento di riqualificazione in cui bisognava rifare la copertura.



2. In riferimento allo scenario Europeo della riqualificazione in paglia, dove si colloca l'Italia?

Si colloca dietro a Francia, Inghilterra, Germania e Svizzera perché hanno normative più semplici rispetto all'Italia. La nostra normativa è più complessa perché abbiamo il problema del sisma.



3. Il ciclo di raccolta della paglia influenza in qualche modo la realizzazione di un progetto o la predisposizione del cliente verso questo tipo di intervento?

No, assolutamente.



4. Quali trasformazioni deve subire la paglia dal momento in cui viene raccolta fino a quando non viene posata?

Lei che tipo di paglia usa e perché?

L'unica cosa è che deve essere conservata in un ambiente coperto, non deve essere esposta alla pioggia e all'umidità. Dev'essere un ambiente pulito dove non ci sono insetti.

Se c'è la possibilità uso la paglia di riso, altrimenti è indifferente e uso la paglia di grano.

Le differenze tra i tipi di paglia riguardano la concentrazione di silice, però ai fini reali della costruzione non cambia niente. Quello che incide è la qualità della paglia: se è pulita, come è stata pressata, come è stata immagazzinata. Questi aspetti sono determinanti per le prestazioni.



5. Di fronte ad un intervento di riqualificazione Lei consiglia ai suoi clienti di utilizzare la paglia?

Perché? Quali sono i pro e i contro?

Sì, loro vengono già da me con l'intenzione di costruire una casa in paglia.

Uno dei vantaggi è che la paglia è un materiale che lavora a secco, non ha bisogno di essere mescolato con acqua, perciò può essere assemblato in poco tempo e il cantiere è molto veloce.

Il contro è lo spessore.



6. Dal punto di vista tecnologico, quali sono le possibili soluzioni per coibentare un edificio esistente utilizzando la paglia?

Si posizionano dei montanti in legno all'interno dei quali viene posizionata la balla di paglia. Alla fine è come un cappotto tradizionale solo che al posto di fissare l'isolante direttamente alla parete esistente, la balla di paglia viene fissata ad un'altra struttura in legno a sua volta fissata alla parete esistente.



7. In riferimento al rapporto con la committenza, quali sono i pregiudizi e i “falsi miti” che ha dovuto sfatare?

Un grande classico è l’infiammabilità. In realtà i miei clienti arrivano già preparati sul materiale perché vengono da corsi, hanno conoscenze personali o hanno già lavorato con la paglia.



8. Dal punto di vista tecnologico e cantieristico, quali sono le maggiori criticità che si incontrano negli interventi di riqualificazioni e come si risolvono?

Il lavorare all’aperto è il principale problema perché si è condizionati dal meteo, se piove non si può lavorare.

Per evitare il contatto con l’acqua bisogna cercare di coprire i muri con delle protezioni oppure preparare i moduli prima e arrivare in cantiere con i pezzi da posizionare.

Altra criticità è la movimentazione dei moduli che sono molto grandi, raggiungono i 10 metri quindi bisogna capire come organizzare il cantiere per garantirne l’ingresso e la movimentazione. Inoltre, bisogna sempre mantenere il cantiere pulito.



9. Dal punto di vista delle prestazioni sul lungo periodo, ha mai monitorato un suo intervento di riqualificazione nel tempo?

Se sì, quali sono le criticità riscontrate?

Quali sono le differenze tra l’impiego della paglia piuttosto che di materiali tradizionali?

Sicuramente ho riscontrato che all’interno sono stati mantenuti livelli di comfort per temperatura e umidità. Al momento non ho ancora riscontrato criticità sul lungo periodo, anche perché le case hanno al massimo 5 anni ed è ancora troppo presto.

Rispetto ai materiali tradizionali la paglia ha prestazioni molto più importanti soprattutto dal punto di vista di gestione del calore, dell’umidità e dell’acustica.



10. Dal punto di vista economico, quali sono le differenze tra progettare un intervento di riqualificazione con la paglia e con materiali tradizionali?

Sicuramente costa di più rispetto al tradizionale, sono due mondi diversi. Bisognerebbe fare un confronto a parità di prestazioni, per esempio a parità di trasmittanza bisognerebbe capire che differenze ci sono.

La differenza è più che altro sul costo della manodopera, perché se è specializzata ha una bassa incidenza, invece un’impresa non abituata a lavorare con la paglia ha un’incidenza maggiore. In poche parole, si risparmia sulla materia prima ma ci si rimette con la manodopera.



11. Per simulare il comportamento termico estivo ed invernale che software usa?

Dove reperisce i dati della paglia da inserire nel software (es. conducibilità, densità, calore specifico)?

Utilizzo *WUFI* oppure *PAN* e i software dell’*ANIT*.

Reperisco i dati dalle schede tecniche delle balle certificate che provengono dall’estero, principalmente dall’Austria. Le mie case sono fatte con materiali certificati compresa la paglia perché è richiesto dalla normativa.

Intervista all'arch. Alessandro Veglio (Studio Case di paglia)



1. Quanto è diffuso in Italia l'uso di cappotti in paglia?

Se non lo è molto, perché secondo lei?

Ha mai usato la paglia in un intervento di riqualificazione?

Per quanto riguarda il contesto italiano non vi è una grande diffusione di cappotti in paglia ma, d'altro canto, è una pratica che si sta diffondendo. La diffusione risulta limitata a pochi casi poiché si tratta di applicare uno spessore consistente (indicativamente 35-45 cm) ad un elemento murario esistente. Credo che presto ci sarà un impiego maggiore, ma per ora si viaggia a velocità ridotta.

Ho utilizzato la paglia in molti interventi di riqualificazione: sono affascinato da questo materiale e, inoltre, ritengo che gli interventi di riqualificazione siano molto utili perché permettono di migliorare le prestazioni di un immobile esistente, limitando così il consumo di suolo.



2. In riferimento allo scenario Europeo della riqualificazione in paglia, dove si colloca l'Italia?

In Italia la cultura degli edifici in paglia è in ritardo rispetto agli altri Paesi europei. Solo negli anni '80 e grazie a Stefano Soldati e Barbara Jones si è iniziato a parlare di edifici in paglia nel nostro paese, per cui siamo in ritardo rispetto all'Europa. Altra motivazione riguarda la tradizione costruttiva italiana: la grande disponibilità di legno e pietra in tempi remoti e l'invenzione del mattone poi, non ha reso necessario il ricorso alla terra e alla paglia per le costruzioni, come invece è successo in altri Paesi europei. Inoltre, essendo l'Italia un territorio a forte rischio sismico, vige una legge strutturale molto severa che di conseguenza contribuisce a limitare l'impiego di questa tecnologia.



3. Il ciclo di raccolta della paglia influenza in qualche modo la realizzazione di un progetto o la predisposizione del cliente verso questo tipo di intervento?

No, poiché dopo la raccolta non è necessario utilizzare immediatamente la paglia poiché può essere stoccata all'interno di capannoni agricoli. Quando ci viene commissionato un edificio in paglia, per prima cosa ci attiviamo per reperire un agricoltore situato nelle vicinanze dell'area di progetto che è disposto ad imballare la paglia in balle piuttosto che in rotoballe. Di solito ci occupiamo anche di organizzare un workshop presso la sede dell'agricoltore per imballare la paglia. Tutto questo fa sì che si crei un circolo virtuoso che conferisce visibilità alla cultura delle costruzioni in paglia e, in più, crea un'opportunità per l'agricoltore che vede il rilancio di un materiale che ha sempre considerato uno scarto.



4. Quali trasformazioni deve subire la paglia dal momento in cui viene raccolta fino a quando non viene posata?

Lei che tipo di paglia usa e perché?

La paglia non deve subire nessuna trasformazione, deve essere solo raccolta, imballata e stoccata in un ambiente coperto e lontano da fonti di umidità fino al momento della posa. Preferiamo utilizzare la paglia di grano per le pareti piene e quella di orzo per i cappotti solamente perché quest'ultima presenta una densità minore rispetto alla paglia di grano e i cappotti non necessitano di elevate densità. La paglia di riso presenta ottime qualità ma noi non l'abbiamo mai utilizzata poiché nel nostro territorio non viene coltivata. Inoltre, la paglia di segale, a causa della sua morfologia, risulta difficile da imballare e la paglia di enkir tende a marcire più facilmente perché conserva quantità maggiori di clorofilla all'interno dello stelo.



**5. Di fronte ad un intervento di riqualificazione Lei consiglia ai suoi clienti di utilizzare la paglia?
Perché? Quali sono i pro e i contro?**

Sì, perché sono convinto che questo materiale abbia delle enormi potenzialità. Un vantaggio della paglia usata negli interventi di riqualificazione riguarda la possibilità di applicare un materiale dotato di massa ad un elemento murario che non ne possiede, come le tipiche pareti in laterizio degli edifici costruiti a seguito della seconda guerra mondiale. Inoltre, si permette anche un rilancio dell'economia agricola perché la paglia, solitamente un materiale di risulta, assume una nuova funzione per cui non necessita più di essere smaltita e in più se ne ricava un vantaggio economico. È qui che si chiudono i due cerchi della sostenibilità ambientale e della sostenibilità economica, passando per quello della sostenibilità sociale e culturale. Altro vantaggio riguarda la traspirabilità: la paglia funge da filtro tra il nostro corpo e l'ambiente esterno poiché assorbe le sostanze nocive presenti nell'aria e le rilascia nel tempo. Inoltre, la paglia non è particolarmente sensibile in caso di incendio ma, allo stesso tempo, i microfilamenti di aria trattenuti tra le fibre la rendono un materiale isolante. Infine, una costruzione in paglia non è irreversibile: in una struttura a telaio si può sia abbattere che ampliare. L'intonaco in terra cruda, dopo averlo reidratato, si può riutilizzare mentre, l'intonaco di calce e sabbia non necessita di smaltimento perché basta frantumarlo e disperderlo nel terreno poiché la calce viene utilizzata a livello di orticoltura come disinfettante per il terreno. Il più grande svantaggio riguarda la certificazione: la paglia non è prodotto certificato e per questa ragione alcune volte può essere declassata in confronto ad altre soluzioni che vedono l'impiego di materiali certificati.



6. Dal punto di vista tecnologico, quali sono le possibili soluzioni per coibentare un edificio esistente utilizzando la paglia?

La cosa fondamentale quando si vuole realizzare un cappotto in paglia è progettare l'attacco a terra: si costruisce un muretto sul quale viene poggiato un binario in legno che ospiterà il primo corso di balle di paglia. Il muretto non è portante, per cui si ancora alla parete esistente e lo spazio residuo tra il nuovo muretto e la parete viene riempito di vetro cellulare o argilla espansa. Un'altra tecnica sostitutiva al muretto riguarda l'impiego di una gabbia di elementi di acciaio riempita in pietrame sulla quale viene posato il binario in legno. Anche in questo caso lo spazio residuo tra la gabbia e la parete esistente può essere riempito in vetro cellulare o in argilla espansa.



7. In riferimento al rapporto con la committenza, quali sono i pregiudizi e i "falsi miti" che ha dovuto sfatare?

I tre grossi miti da sfatare sono per ordine di importanza:

- la casa in paglia è la casa dei tre porcellini;
- la casa in paglia è soggetta all'aggressione dei roditori;
- la casa in paglia è facilmente infiammabile.



8. Dal punto di vista tecnologico e cantieristico, quali sono le maggiori criticità che si incontrano negli interventi di riqualificazioni e come si risolvono?

Dal punto di vista tecnologico bisogna porre molta attenzione a garantire sempre la traspirabilità della paglia: come qualsiasi materiale di origine naturale se non funge da volano termo-igrometrico marcisce. Dal punto di vista cantieristico non c'è nessuna difficoltà, anzi si tratta di cantieri che non necessitano di gru e attrezzi complessi: tutta l'attrezzatura (compressore, flessibile, martelli, martinetti e pochi attrezzi elettrici) può essere trasportata nel cofano di una macchina. Solitamente, si utilizzano trabattelli mobili al posto dei ponteggi perché questi ultimi non permettono di lavorare agevolmente.

9. Dal punto di vista delle prestazioni sul lungo periodo, ha mai monitorato un suo intervento di riqualificazione nel tempo?



Se sì, quali sono le criticità riscontrate?

Quali sono le differenze tra l'impiego della paglia piuttosto che di materiali tradizionali?

Ho monitorato soltanto un intervento a Rimini con Stefano Soldati ma siamo molto in contatto con i nostri clienti che non hanno presentato lamentele.

La differenza tra l'impiego della paglia piuttosto che materiale tradizionali riguarda il peso. Per un metro cubo di parete in paglia, compresa di telaio in legno e intonaci, si parla di 150-180 kg/m³ mentre per una parete in laterizio si parla di tutt'altro ordine di grandezza.

10. Dal punto di vista economico, quali sono le differenze tra progettare un intervento di riqualificazione con la paglia e con materiali tradizionali?



Una riqualificazione in bioarchitettura non è più costosa rispetto riqualificazione in materiali tradizionali ma lo diventa quando il progettista è inesperto poiché si dilatano i tempi e, di conseguenza, anche i costi.

Rispetto ad un'architettura tradizionale la fase di progettazione ha un costo maggiore perché è necessario progettare in modo dettagliato, come per una casa prefabbricata.

Operando un confronto tra una casa in paglia e una casa in X-lam o in muratura, a parità di classe energetica, una casa in paglia costa 1/3 in meno e il cantiere dura solo sei mesi. Questa differenza è quantificabile non solo nel costo del materiale, ma anche nei costi per il cantiere: non produce residui che devono essere smaltiti e non richiede una manodopera specializzata.



11. Per simulare il comportamento termico estivo ed invernale che software usa?

Dove reperisce i dati della paglia da inserire nel software (es. conducibilità, densità, calore specifico)?

Uso i software dell'*ANIT*, che sono molto vantaggiosi perché vengono aggiornati sovente. In passato ho usato *Thermus* ma non era consentito inserire dati personalizzati, oppure ho usato un software distribuito ai soci *CasaClima* nel quale era possibile inserire dei dati personalizzati.

Reperisco i dati in letteratura.

Conclusioni

Per quanto concerne la diffusione dei cappotti in paglia in Italia quasi tutti gli intervistati sono d'accordo sul fatto che non siano molto diffusi per via dello spessore della balla di paglia che, in un intervento di riqualificazione, si va a sommare allo spessore della parete esistente provocando la riduzione della luce in entrata. Altre motivazioni sono riconducibili alla normativa italiana che non riconosce la paglia come un materiale da costruzione, al fatto che non esiste un sistema tecnologico ingegnerizzato e di conseguenza è necessaria una forte manodopera e al fatto che i clienti non conoscono questa tecnica costruttiva. Inoltre, l'arch. Caggiano spiega «è una tecnica che richiede un livello di competenza che non caratterizza il profilo dell'artigiano classico», è necessario quindi istruire le maestranze: un lavoro che richiede tempo e di conseguenza si traduce in poca manodopera specializzata. Facendo riferimento allo scenario europeo della riqualificazione in paglia tutti gli intervistati sono d'accordo sul fatto che l'Italia, insieme a Spagna, Portogallo e paesi dell'Est, occupa gli ultimi posti di un'ipotetica classifica, in coda a Francia e Germania, Inghilterra e Svizzera. La ragione risiede nella normativa italiana, la quale risulta più complessa rispetto alle normative degli altri Paesi essendo l'Italia un territorio a forte rischio sismico. Inoltre, sostiene l'arch. Veglio: «Secondo me è un problema di mentalità: l'italiano fa fatica a cambiare opinione, non è una cosa che tradizionalmente è nella nostra testa».

Tutti gli intervistati sono d'accordo sul fatto che la paglia, una volta raccolta, non deve subire alcuna trasformazione se non essere imballata e stoccata. Infatti, spiega l'arch. Caggiano: «La paglia nel momento in cui si raccoglie viene portata dalla condizione di inconsistenza al mattone di paglia. Più che trasformazione la definirei una riconfigurazione geometrica e poi da lì in avanti nulla è trasformato e sarebbe un errore farlo». Inoltre, delle differenze tra i tipi di paglia esistono, ma non sono queste che contribuiscono dare un buon risultato. Questo concetto è ben espresso dalle parole dell'arch. Caggiano: «Le differenze ci sono, ma sono molto più importanti le differenze che metti nel progetto. Il fatto di riuscire ad utilizzare una paglia che sia quanto più

vicina possibile dà una risposta matura al progetto. L'equilibrio dovrebbe essere tarato in base alla distanza chilometrica e quando si sa quale paglia si può ottenere si decide di individuare delle soluzioni di progetto che siano in sicurezza rispetto al tipo di prodotto che si è utilizzato».

Per quanto riguarda i pregiudizi che i clienti nutrono nei confronti della paglia la maggior parte degli intervistati ritiene che i committenti credano che un edificio in paglia costi meno di uno costruito con tecniche tradizionali. La motivazione risiede nel fatto che, secondo l'arch. Caggiano, «per anni chi ha fatto promozione della paglia l'ha spinta come una soluzione a basso costo». Continua l'arch. Caggiano: «basso costo significa bassa qualità e bassa qualità su un edificio sensibile vuol dire portarlo verso delle criticità che sono decisamente più condizionanti rispetto alla bassa qualità di un edificio tradizionale realizzato in laterizio dove al massimo vi si forma una muffa». Inoltre, riportando le parole dell'arch. Veglio, altri miti da sfatare sono: «la casa in paglia non è la casa dei tre porcellini, poi il problema dei roditori e dell'inflammabilità. Questi sono in ordine i grossi miti».

Quasi tutti gli intervistati sono d'accordo sul fatto che tra le maggiori criticità dei cantieri in paglia emerge il problema della sensibilità di questo materiale nei confronti di acqua e umidità: è necessario proteggere il manufatto dagli agenti atmosferici, i quali potrebbero compromettere l'intero l'intervento. Altro motivo, secondo gli architetti Macrì e Mancuso, è legato allo stoccaggio del materiale in cantiere. Infatti, questi ultimi spiegano: «Le maggiori difficoltà sono legate allo stoccaggio del materiale per dimensioni e per attaccabilità dagli agenti atmosferici». Quindi è necessario prevedere un posto abbastanza grande per poter conservare la paglia in condizioni adeguate, cioè lontana da acqua e situazioni di umidità accentuata. Altre criticità concernono la pulizia del cantiere e l'inflammabilità della paglia non posata.

Confrontando i costi di un intervento di riqualificazione con la paglia piuttosto che con materiali tradizionali, quasi tutti gli intervistati risultano in accordo: l'impiego della paglia non comporta un costo maggiore rispetto all'impiego di materiali tradizionali. Il perché è ben espresso dalle parole degli architetti Macrì e Mancuso: «La paglia in sé non ha un costo elevato, ma al costo del materiale bisogna aggiungere

quello della manodopera che ha un valore più elevato rispetto a quella necessaria ai materiali tradizionali». Inoltre, l'arch. Preti sostiene la stessa tesi: «si risparmia sulla materia prima ma ci si rimette con la manodopera». Infine, come spiega l'arch. Caggiano, la differenza principale tra i due tipi di interventi non sta nel costo, ma nell'obiettivo che si vuole raggiungere a seguito dell'intervento: «nel convenzionale l'obiettivo è costruire. Mentre l'obiettivo di chi vuole costruire un edificio in paglia è raggiungere un certo livello di comfort e salubrità all'interno dello spazio. Questa è la principale differenza sotto l'aspetto qualitativo».

Per quanto riguarda la questione software, ovvero i software utilizzati per simulare il comportamento termico di un manufatto, la maggior parte degli intervistati usa *WUFI* e il pacchetto di software distribuito dall'*ANIT*, più di rado vengono utilizzati software come *Energyplus*, *Thermus*, *Termolog* ed *Edilclima*. Mentre i dati relativi alla paglia (come conducibilità termica, calore specifico, etc) vengono reperiti da tutti gli intervistati in letteratura, solo alcuni utilizzano i dati forniti dalla normativa francese o tedesca.

Dopo aver analizzato le risposte degli intervistati sono state elaborate alcune riflessioni significative.

La scarsa diffusione in Italia di questa tecnica costruttiva è legata soprattutto all'assenza di una normativa specifica volta a disciplinare questo materiale. Dal momento in cui, la paglia, non è riconosciuta dalla legge come materiale da costruzione, non può essere certificata. Per questa ragione ci sono delle difficoltà nell'accettare l'impiego della paglia in architettura. L'unico modo per utilizzare delle balle di paglia certificate è comprarle da produttori esteri. Ma così facendo viene a mancare il fattore della sostenibilità ambientale (perché bisogna tener conto delle ricadute sull'ambiente in termini di emissioni di CO₂ che comporta un lungo viaggio), economica (perché non acquistando la paglia dal contadino che si trova a pochi km di distanza dal sito di costruzione non si sostiene il rilancio dell'economia agricola locale) e socio-culturale (perché non si promuove la diffusione di questo sistema costruttivo).

Essendo l'Italia un paese dalle lunghe tradizioni, si fa fatica a rico-

noscere come altrettanto validi altri sistemi costruttivi oltre a quelli usuali. Dunque si è abituati e affezionati al mattone e al calcestruzzo ed è difficile riporre la stessa fiducia in materiali così diversi come la paglia o altri materiali di origine naturale. È questo uno dei principali motivi che ostacola la diffusione della paglia nel settore edile.

Riflessioni di tipo più tecnico riguardano le questioni della manodopera, della cantierizzazione e dei sistemi ingegnerizzati: anch'essi, purtroppo, tasti dolenti del discorso. La carenza di manodopera specializzata implica l'impiego della manodopera tradizionale che tende a lavorare "come è abituata a fare", ignara del fatto che questo modo di agire può comportare gravi errori in un sistema che necessita di particolari accortezze. Altra ragione che ostacola la diffusione di questo sistema riguarda i problemi che comporta un cantiere cittadino, cioè la mancanza di spazio per lo stoccaggio (pulito e non a contatto con acqua e umidità) di voluminose quantità di paglia e il grosso spessore aggiunto alla parete esistente che crea discontinuità con le facciate adiacenti. I suddetti motivi rendono questa tecnica applicata maggiormente in ambiti rurali. Inoltre, la mancanza di un sistema tecnologico ingegnerizzato costituisce un altro scoglio che ne limita la diffusione perché non si dispone di un sistema veloce da applicare ed eseguibile completamente a secco.

Altra criticità concerne l'uso dei software e soprattutto dei dati relativi alla paglia inseriti all'interno di essi.

Dal momento in cui non esistono dati univoci, si fa riferimento ai dati presenti in letteratura applicando (di solito) un fattore peggiorativo. C'è quindi in questo campo una grande libertà che non porta a risultati univoci e confrontabili. Anche questo problema è dovuto alla mancanza di una normativa che fornisca istruzioni dettagliate sui dati di questo materiale.

In ultimo, dopo un elenco abbastanza consistente di aspetti irrisolti si vogliono operare alcune considerazioni positive. Non sussistono dubbi riguardo alle notevoli proprietà isolanti della paglia, dovute alla presenza di aria tra le fibre. Oltre a fornire l'adeguato isolamento termico ad un manufatto, il notevole spessore delle balle fornisce la massa opportuna a garantire un buon comportamento durante il periodo estivo (con valori di sfasamento dell'onda termica prossimi alle

12 ore).

Dal punto di vista tecnologico la paglia costituisce un supporto facilmente intonacabile, che a differenza di altri sistemi di rivestimento a secco di tipo tradizionale non richiede l'impiego di tasselli o colle. Il vantaggio di utilizzare intonaci in terra cruda o calce e sabbia è che i primi si possono riutilizzare dopo esser stati reidratati e per smaltire i secondi è sufficiente frantumarli e disperderli nel terreno, apportandovi un effetto benefico. Inoltre, si tratta di un materiale leggero quindi facilmente trasportabile da una persona senza l'ausilio di mezzi meccanici e lavorabile con attrezzi poco energivori e a basso grado di pericolosità.

Impiegare la paglia in architettura vuol dire creare un ambiente salubre perché quest'ultima funge da filtro tra l'ambiente interno e l'ambiente esterno, trattenendo al suo interno le sostanze nocive presenti nell'aria. Inoltre, la paglia viene solitamente associata ad intonaci in terra cruda perché, oltre a garantire la traspirabilità di cui questa necessita, fungono da regolatori igrometrici naturali (cioè assorbono l'umidità quando l'aria è satura e la rilasciano quando l'ambiente è troppo secco).

Infine, l'impiego della paglia riporta l'economia sul territorio, aprendo una nuova prospettiva per l'agricoltura che non deve più gestire un materiale di risulta, ma anzi ne ricava un vantaggio economico.

MISURE IN CAMPO
E SIMULAZIONI

In questo capitolo si riportano i risultati delle misurazioni di trasmittanza termica in situ su due edifici realizzati in paglia. Lo scopo è quello di confrontare i risultati ottenuti dalle misure in opera con i risultati ricavati dalle simulazioni termoigrometriche⁸².

Il primo caso studio, Casa Muratore ad Alba (TO) è un intervento di riqualificazione, mentre il secondo, Casa Cembo a Saluggia (VC), è un intervento di nuova costruzione.

La scelta di indagare anche un intervento di nuova costruzione, spostando l'attenzione dal tema centrale della riqualificazione, è legata al fatto che in Italia la pratica di riqualificare utilizzando la paglia è ancora poco diffusa, mentre prende sempre più piede uno scenario in cui la paglia è utilizzata nelle nuove costruzioni.

Il primo paragrafo di questo capitolo è dedicato alla descrizione teorica della metodologia utilizzata per le misurazioni.

I paragrafi successivi, invece, sono dedicati all'analisi del singolo caso studio, ai risultati ottenuti a seguito delle misure di trasmittanza termica in opera ed al loro confronto con le simulazioni termoigrometriche.

⁸² le simulazioni sono state effettuate con il software di calcolo numerico *Termolog Epix 10* distribuito da *Logical Soft* (www.logical.it).

La misura della trasmittanza termica in opera

La trasmittanza termica è il parametro principale utilizzato per calcolare le dispersioni termiche attraverso l'involucro di un edificio.

La trasmittanza termica, indicata con la lettera U e misurata in W/m^2K , rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari ad $1^\circ C$ (UNI EN ISO 7345:2018).

Dipende dalle caratteristiche dei materiali che costituiscono la struttura che viene attraversata dal flusso di calore e dalle condizioni di scambio termico liminare (R_{si} e R_{se}) cioè alla resistenza che incontra il flusso di calore prima di entrare nella struttura internamente ed esternamente. Se la parete è composta da più materiali, la trasmittanza termica è calcolata come l'inverso della sommatoria delle resistenze termiche (R) dei singoli strati.

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{s_n}{\lambda_n} + R_n + R_a + \frac{1}{h_e}}$$

Dove:

$1/h_i$ resistenza liminare sulla facciata interna della parete misurata [W/m^2k]

s/λ resistenza termica di uno o più strati di materiale omogeneo [m^2k/W]

$R_n = 1/C$ resistenza termica di strati di materiale non omogeneo [m^2k/W]

R_a resistenza termica di eventuali intercapedini [m^2k/W]

$1/h_e$ resistenza liminare sulla facciata esterna della parete misurata [W/m^2k]

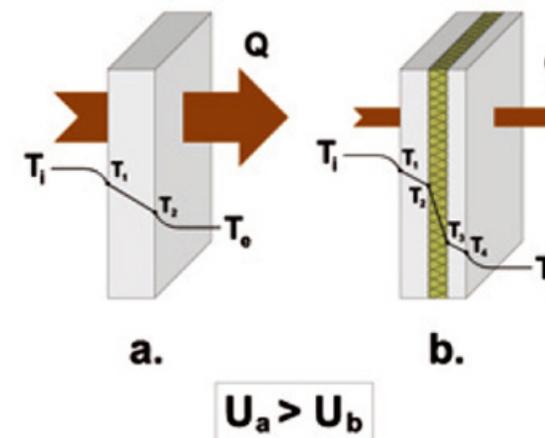


Fig. 95 Flusso di calore attraverso una parete non isolata e una parete isolata.
Fonte: www.garroneserramenti.it

Nel caso di una chiusura opaca, l'inserimento di materiali isolanti in una stratigrafia rallenta il flusso di calore, per cui si ha che una chiusura isolata presenta un valore di trasmittanza termica più basso rispetto ad una non isolata (Fig. 95).

In fase progettuale, la trasmittanza termica di un componente edilizio (con stratigrafia nota) si calcola attraverso la norma EN ISO 6946:2018 utilizzando i dati presenti sulle schede tecniche dei materiali selezionati. Mentre, per valutare la trasmittanza di edifici costruiti si può procedere in modo analitico (ai sensi della norma EN ISO 6946:2018) reperendo i dati relativi ai materiali impiegati da progetti o Attestati di Prestazione Energetica (A.P.E.) oppure si può ricorrere a verifiche strumentali della trasmittanza utilizzando il metodo del termoflussimetro. Questo metodo risulta vantaggioso perché è in grado di valutare in maniera quantitativa la trasmittanza senza procedere con un intervento invasivo. Un contro, invece, riguarda il fatto che i valori misurati potrebbero essere superiori anche fino al 20% rispetto ai valori di calcolo (per il deterioramento dei materiali isolanti nel corso del tempo, una messa in opera difforme dal progetto o condizioni ambientali reali diverse da quelle considerate in fase di progetto), ma nonostante ciò resta una metodologia molto affidabile.

Il metodo del termoflussimetro

La valutazione dei valori termofisici di un componente opaco si effettua tramite il metodo del termoflussimetro, ai sensi della norma ISO 9869:2015 la quale individua l'apparecchiatura, le tecniche di misurazione, i dati necessari e le modalità di calcolo dell'analisi termoflussimetrica. Inoltre, la suddetta norma circoscrive il campo di utilizzo del metodo alle «componenti piane degli edifici costituite principalmente da strati opachi perpendicolari al flusso di calore e non sottoposti a flussi di calore laterali»⁸³ oppure «componenti costituite da strati quasi omogenei perpendicolari al flusso di calore, a condizione che le dimensioni di qualsiasi disomogeneità in prossimità del termoflussimetro (HFM) sia molto più piccola rispetto alle relative dimensioni laterali e non ci siano ponti termici individuabili attraverso l'utilizzo di termografia a raggi infrarossi»⁸⁴.

Per l'acquisizione dei dati quantitativi si utilizza un'apparecchiatura dotata di sonde, piastre e datalogger che permette di valutare, in seguito all'elaborazione dei dati raccolti, la trasmittanza di un componente opaco in base alla quantità di calore che viene trasferito tra le due facce della parete in esame (flusso termico, Q) e alla differenza di temperatura tra le due superfici (T_{si} e T_{se}), secondo la *legge di Fourier*. Nella figura 96 sono visibili, sinteticamente, tutte le fasi operative dell'analisi termoflussimetrica in situ di una parete in situ ai sensi della norma ISO 9869: 2015.

83 UNI ISO 9869-1:2015.

84 *Ibidem*

Sequenza	Fase operativa	Operazioni	
1	Scelta della parete da analizzare	Scelta della parete rispetto alla posizione del sole e alla direzione dei venti prevalenti. Realizzazione di un'analisi termografica per verificare l'omogeneità dell'elemento.	
2	Verifica della verticalità della parete	Analisi della verticalità con il filo a piombo	
3	Montaggio dell'apparecchiatura	Fissaggio della piastra	Fissaggio della piastra all'altezza di 1 m dal pavimento, utilizzando speciale fissante o nastro adesivo. Collegamento della piastra al datalogger.
		Fissaggio delle termocoppie	Fissaggio delle termocoppie in prossimità della piastra con nastro adesivo. Collegamento delle termocoppie al datalogger.
		Inserimento del sensore termico	Collegamento del sensore di temp. dell'aria al datalogger
4	Programmazione dell'apparecchiatura	Accensione dell'apparecchiatura. Programmazione dell'intervallo di monitoraggio.	
5	Analisi termoflussimetrica	Monitoraggio termoflussimetrico effettuato lasciando lo strumento in opera per almeno 72 ore.	
6	Elaborazione dei dati	Elaborazione dei dati con appositi software per misurare la resistenza, conduttanza e trasmittanza.	
7	Report della prova	Realizzazione del report conclusivo della prova.	

Fig. 96 Fasi operative dell'analisi termoflussimetrica in situ.

Fonte: Lucchi, Elena, *Diagnosi energetica strumentale degli edifici: Termografia e analisi non distruttive, Normativa e procedure operative*, Palermo: Dario Flaccovio, 2012.

Componenti della strumentazione

Nell'ambito della presente tesi di laurea sono state effettuate delle misure di trasmittanza termica in opera su due casi studio grazie alla strumentazione fornita dal laboratorio L.A.M.S.A.⁸⁵ del Politecnico di Torino.

La strumentazione, prodotta da LSI LASTEM⁸⁶, è costituita da:

- n.1 termoflussimetro (ESR240): misura il flusso termico (in W/mK) che attraversa l'oggetto sul quale esso è applicato. Consiste in «un dispositivo contenente un trasduttore che genera un segnale elettrico funzione del flusso di calore che lo attraversa»⁸⁷, si tratta cioè di una “termopila” che «determina una tensione proporzionale alla differenza di temperatura tra le due facce e, nota la resistenza termica della piastra, fornisce una tensione proporzionale al flusso di calore trasmesso»⁸⁸. Il termoflussimetro è composto da una zona centrale, preposta al rilievo del flusso termico, posizionata all'interno di un involucro di materiale conduttore (Fig.97).

Termoflussimetro

Unità di misura	W/m ²
Incertezza	5% su 12 hrs di misura
Sensibilità	50 μV/W/ m ⁻²
Campo di misura	-2000 ÷ +2000 W/ m ²
Resistenza termica	<6,25 10 E-3 K m ² /W
Materiale del sensore	Alluminio anodizzato
Temperatura operativa	-30 ÷ +70°C

85 Laboratorio di Analisi e Modellazione dei Sistemi Ambientali, Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino.

86 Azienda con sede a Milano (Italia), sviluppa, produce e commercializza una gamma completa di sistemi per il monitoraggio ambientale.

87 Lanzoni, Davide, *Diagnosi e certificazione energetica: prove sperimentali sugli edifici: termografia, blower door, termoflussimetro*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2010.

88 Raimondo, Luca, Guglielmina Mutani e Chiara Massaia, *La procedura di certificazione della prestazione energetica : dal sopralluogo all'attestato*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2014.



Fig. 97 Il termoflussimetro (immagine a sinistra).

Fig. 98 La sonda di temperatura superficiale (immagine a destra).



Fig. 99 La sonda di temperatura ambiente (immagine a sinistra).

Fig. 100 Il datalogger (immagine a destra).

- n. 4 sonde di temperatura superficiale (EST124): permettono di determinare la temperatura della superficie in esame (in °C) misurando la differenza di corrente tra i trasduttori posizionati all'interno dell'ambiente e quelli posizionati all'esterno (Fig.98).

Sensore di temperatura a contatto

Unità di misura	°C
Campo di misura	In funzione del sistema di acquisizione dati
Incertezza	0,15°C (0°C)
Risoluzione	0,01 °C
Tempo di risposta (T90 aria)	35 sec
Utilizzo	Indoor e outdoor
Dimensioni	30x20 mm spessore 2,5 mm
Temperatura operativa	-40 ÷ +80 °C

- n. 2 sonde di temperatura ambiente (EST133): permettono di misurare la temperatura dell'aria (in °C) all'interno e all'esterno dell'ambiente (Fig.99).

Sensore di temperatura dell'aria

Unità di misura	°C
Campo di misura	In funzione del sistema di acquisizione dati
Incertezza	0,10°C (0°C)
Risoluzione	0,01 °C
Tempo di risposta (T90 aria)	30 sec senza filtro protettivo, 6 min con filtro protettivo (velocità aria 0,2 m/s)
Temperatura operativa	-40° ÷ +80° °C

Tutti gli strumenti sono dotati di un cavo (di materiale conduttore) atto a collegarli ai datalogger (Fig.100), in modo da permettere la trasmissione dei dati.

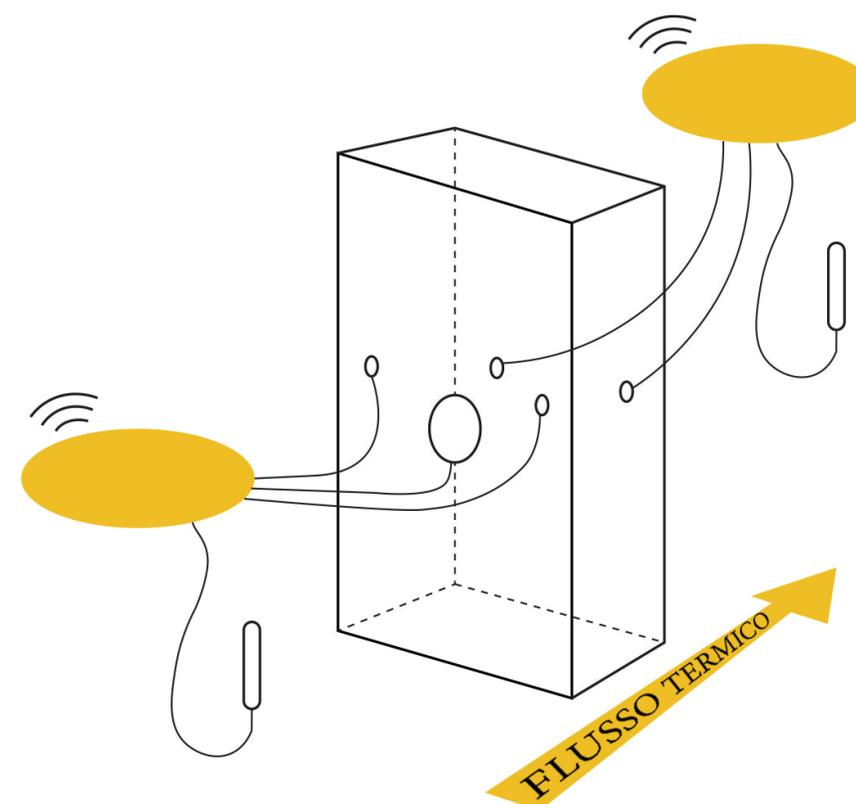


Fig. 101 Schema dei componenti di misura posizionati su una parete oggetto di misura. Dove: Q=flusso termico [W/m²]; T_{ai}=temperatura dell'aria interna [°C]; T_{ae}=temperatura dell'aria esterna [°C]; T_{si}=temperatura superficiale interna [°C]; T_{se}=temperatura superficiale esterna [°C];

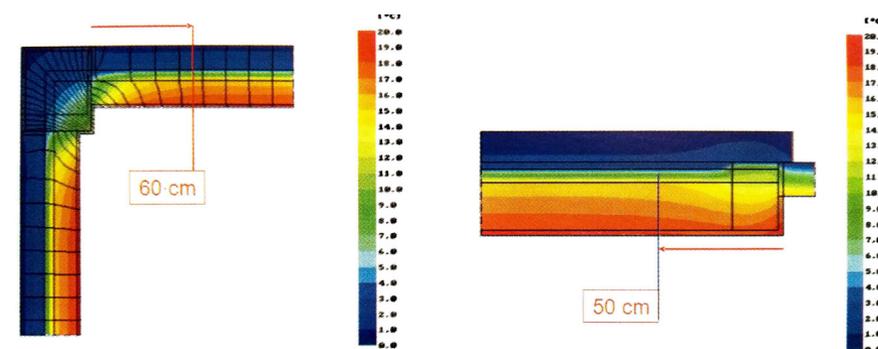


Fig. 102 Indicazioni per il posizionamento del termoflussimetro. Fonte: www.anit.it in Lanzoni, Davide, *Diagnosi e certificazione energetica: prove sperimentali sugli edifici: termografia, blower door, termoflussimetro*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2010.

- n. 1 Datalogger radio MASTER (Rlog): Connesso via cavo a sensori come EST124 e ESR240 e via radio ad unità R-Log SLAVE dalle quali riceve e memorizza, i valori da quest'ultimi acquisiti. È il datalogger principale ed è predisposto a comunicare con il pc in modo da permettere di scaricare facilmente i dati.
- n. 1 Datalogger radio SLAVE (Rlog): Connesso via cavo a sensori come EST124 e ESR240, invia al R-Log MASTER i valori da esso acquisiti. L'apparato possiede comunque una sua memoria di back-up utile in quei casi in cui la comunicazione radio dei valori a R-Log MASTER si interrompe.

Operazioni preliminari alla misura

Prima di procedere con il posizionamento della strumentazione è necessario verificare alcune condizioni:

- Risulta importante selezionare accuratamente la porzione di parete sulla quale effettuare le misure. È necessario garantire la monodirezionalità del flusso termico e per farlo è essenziale posizionarsi sufficientemente distanti da zone che presentano irregolarità termiche come ponti termici, sorgenti di calore e serramenti (Fig.102).
- È necessario verificare che non siano presenti elementi di discontinuità non visibili come ponti termici o strati realizzati in modo non omogeneo (per forma di elementi o per materiale). Solitamente per effettuare questo tipo di verifica si utilizza una termocamera all'infrarosso, la quale permette di mappare la temperatura superficiale apparente della scena inquadrata, misurando la radiazione infrarossa emessa senza entrarvi in contatto (Fig 103; Fig. 104; Fig. 105; Fig. 106).
- È necessaria una differenza di temperatura di almeno 15° C tra l'ambiente esterno e l'ambiente interno. Per questa ragione le misure si effettuano nel periodo invernale e nei giorni in cui è attivo l'impianto di riscaldamento.
- La parete esterna non deve essere soggetta a irraggiamento diretto, pioggia o neve. Per cui si preferisce posizionare la strumentazione sulla parete esposta a Nord per evitare gli effetti dell'irraggiamento



Fig. 104 Termografia effettuata sulla parete esposta a Sud-Ovest (Casa Cembo, Saluggia).

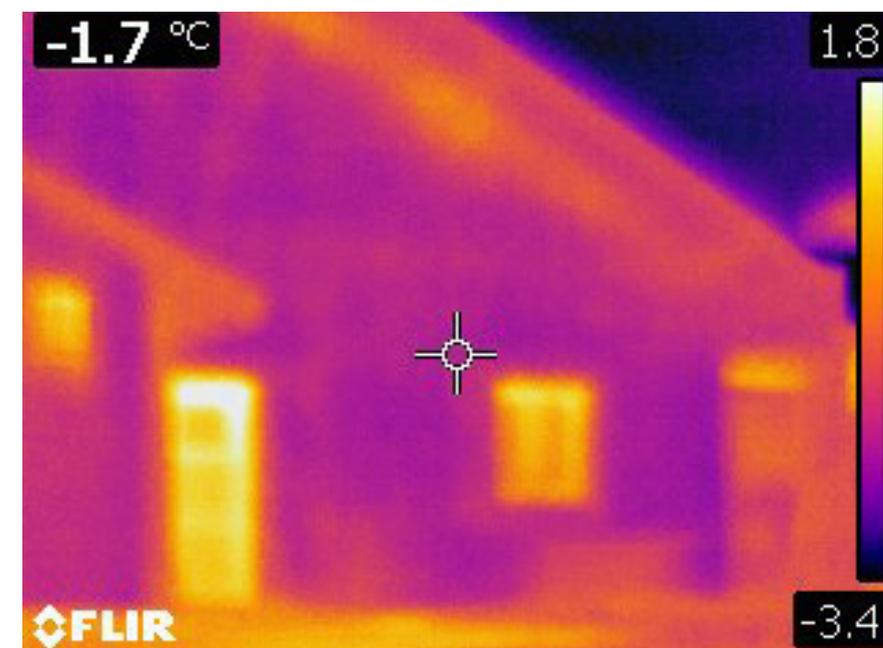


Fig. 104 Termografia effettuata sulla parete esposta a Sud-Est (Casa Cembo, Saluggia).

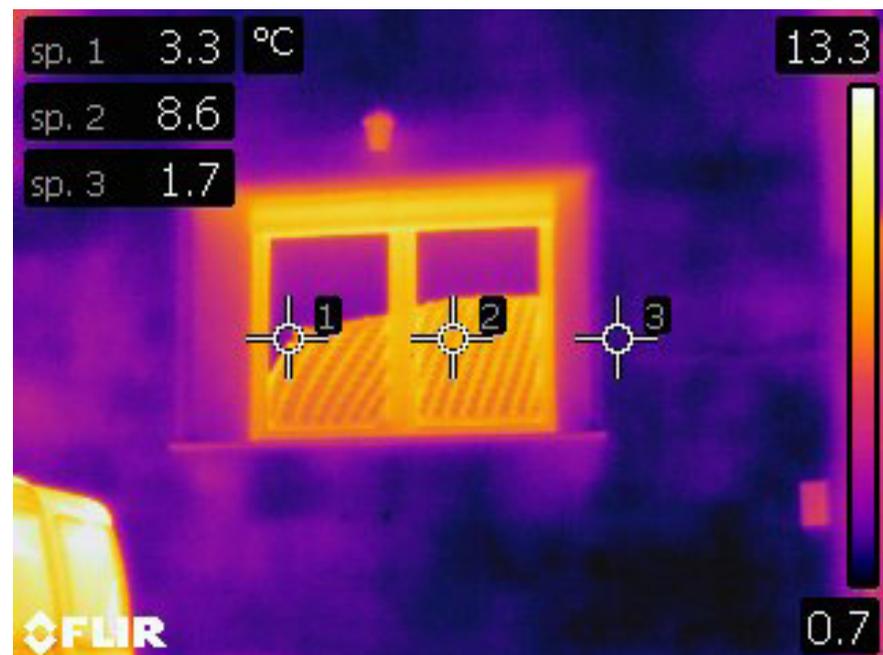


Fig. 105 Termografia effettuata sul fronte esterno della parete esposta a Nord-Est (Casa Muratore, Alba).

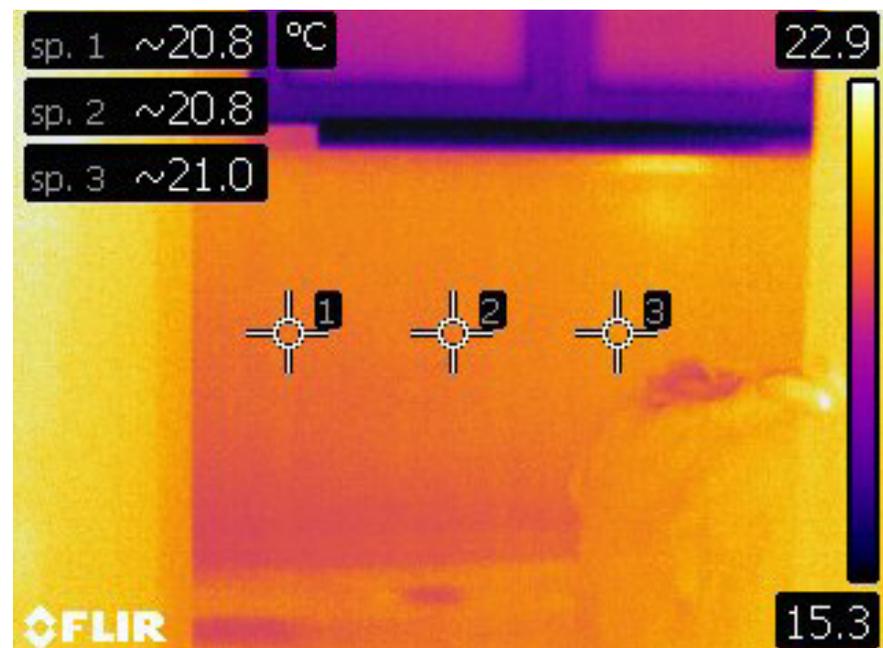


Fig. 106 Termografia effettuata sul fronte interno della parete esposta a Nord-Est (Casa Muratore, Alba).

diretto e, inoltre, si ricorre all'impiego di sistemi volti a proteggere la strumentazione dagli agenti atmosferici.

- In linea generale, sia all'interno che all'esterno della parete, la strumentazione deve essere posizionata lontana da fonti di calore, di umidità e da ventilazione naturale e/o artificiale (Fig. 106).

La messa in opera della strumentazione

Nella posa in opera degli strumenti è necessario curare la perfetta adesione dei sensori alla parete aiutandosi, se necessario, usando della pasta conduttiva al fine di ridurre la resistenza termica di contatto. Sul lato interno vengono posizionati: il termoflussimetro, due sonde di temperatura superficiale e una sonda di temperatura dell'aria, tutti collegati via cavo al datalogger interno. Mentre, sul lato esterno e alla stessa quota, vengono posizionate due sonde di temperatura superficiale e una sonda di temperatura dell'aria, rispettivamente collegate al datalogger esterno.

L'acquisizione dei dati avviene ad intervalli regolari e l'intera misura deve durare almeno 72 ore, in accordo con la norma ISO 8301:1991.

L'elaborazione dei risultati

Dal momento che la parete oggetto di misura non è sottoposta a condizioni termiche di tipo stazionario ma si trova in condizioni operative reali, ovvero dinamiche, è soggetta a condizioni al contorno variabili nel tempo. L'elaborazione dei dati dovrà tener conto degli effetti transitori a cui è sottoposta la parete, di conseguenza non è possibile utilizzare i valori istantanei ma bisogna utilizzare di valori medi, che possono essere calcolati attraverso tue tecniche di elaborazione dei dati misurati:

- il metodo dell'identificazione "black-box".
- il metodo delle medie progressive.

Esterno dell'edificio					
Localizzazione	Tipo di fonte				
Lontano da fonti di calore	Irraggiamento solare diretto				
Lontano da fonti di umidità	Pioggia	Neve	Grandine	Nebbia	Condensa superficiale
Lontano da ventilazione naturale					
Lontano da ventilazione diretta					
Lontano da vegetazione					
Interno dell'edificio					
Localizzazione	Tipo di fonte				
Lontano da fonti di calore	Impianto di climatizzazione estiva e invernale	Impianto di ventilazione meccanica controllata con recupero di calore	Centrale termica o zone di cottura cibo	Passaggio di persone	
Lontano da fonti di umidità	Cucine	Bagni	Presenza di persone	Vegetazione	
Lontano da ventilazione naturale e artificiale	Impianto di climatizzazione estiva e invernale	Impianto di ventilazione meccanica controllata	Infiltrazioni d'aria da serramenti	Infiltrazioni d'aria da giunzioni strutturali	
Caratteristiche della parete					
Localizzazione	Tipo di fonte				
Priva di irregolarità termiche	Ponti termici	Disuniformità di materiali	Degrado materico	Problemi di posa	
Priva di irregolarità igrometriche	Assenza di umidità superficiale	Assenza di umidità interstiziale			
Priva di degrado materico	Fessurazioni	Decadimento materico			

Fig. 107 Localizzazione del termoflussimetro in un edificio.
Fonte: Lucchi, Elena, *Diagnosi energetica strumentale degli edifici: Termografia e analisi non distruttive, Normativa e procedure operative*, Palermo: Dario Flaccovio, 2012.

Il metodo dell'identificazione "black-box"

Il nome deriva dal fatto che non presuppone la conoscenza della parete in esame, ma necessita solo delle serie temporali di dati di ingresso (la temperatura interna ed esterna) e di quelli in uscita (il flusso) per effettuare il calcolo. Il procedimento è ben descritto dalle parole di Lanzoni: «Dai dati si risale alle caratteristiche della parete ricavando la conduttanza. Più in dettaglio, si suppone che il flusso ad un certo istante di tempo dipenda linearmente dal valore del flusso stesso nei precedenti n passi e dai valori di T_i e T_e nei precedenti nb_1 e nb_2 passi. L'utente fissa il numero di passi na , nb_1 , nb_2 e vengono calcolati i coefficienti a , b_1 e b_2 che minimizzano lo scarto quadratico tra il valore del flusso calcolato e quello misurato»⁸⁹.

Questo metodo, oltre a richiedere tempi di monitoraggio contenuti, anche per l'elaborazione dei dati presuppone tempi brevi (circa 30 minuti). Allo stesso tempo però, possiede anche alcuni elementi di criticità:

- necessita di condizioni al contorno fortemente dinamiche, ciò significa che la temperatura esterna deve essere molto variabile;
- trattandosi di una tecnica puramente numerica, i risultati non possono considerarsi sempre attendibili.

Il metodo delle medie progressive

Il metodo delle medie progressive, descritto dalla norma ISO 9869:2015, è stato utilizzato nell'ambito della presente tesi di laurea. Si tratta di un metodo secondo cui «la conduttanza o la trasmittanza possono essere ottenute dal rapporto tra il flusso di calore areico (Q) di ciascuna misura e la media della differenza di temperatura. Ciò sta a significare che si assume che tutto il flusso di calore misurato sulla superficie interna passa attraverso lo strumento. Questo implica che si

⁸⁹ Lanzoni, Davide, *Diagnosi e certificazione energetica: prove sperimentali sugli edifici: termografia, blower door, termoflussimetro*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2010.

assume un profilo di temperatura uguale su tutta la sezione dell'elemento dall'inizio alla fine del test»⁹⁰.

Il calcolo della conduttanza e della trasmittanza avviene attraverso le seguenti formule:

$$C = \frac{\sum_j Q_j}{\sum_j (T_{si j} - T_{se j})}$$

$$U = \frac{\sum_j Q_j}{\sum_j (T_{ai j} - T_{ae j})}$$

Dove:

Q = flusso termico passante per l'elemento [W/m²]

T_{si} = Temperatura superficiale interna [°C]

T_{se} = Temperatura superficiale esterna [°C]

T_{ai} = Temperatura dell'aria interna [°C]

T_{ae} = Temperatura dell'aria esterna [°C]

j = j-esima misura effettuata

Più semplicemente, il metodo delle medie progressive «consiste nel calcolare la conduttanza (o la trasmittanza) utilizzando ad ogni istante i valori medi di flusso e temperatura, calcolati su tutti gli istanti precedenti, istantanei, e la media è ottenuta in tempi lunghi di misura»⁹¹.

Per ogni campionamento vengono riportati, sia sotto forma tabulare che grafica, i valori medi di: flusso termico, temperatura dell'aria interna, temperatura dell'aria esterna, temperatura superficiale interna, temperatura superficiale esterna, conduttanza e trasmittanza. Infine, vengono presi in considerazione i valori finali poiché dovrebbe essere quelli che meglio approssimano il valore reale della struttura analizzata. L'affidabilità dei risultati sarà tanto maggiore quanto più numerosi sono i dati acquisiti.

⁹⁰ Ibidem

⁹¹ Ibidem

La prova può essere ritenuta valida quando i valori medi ottenuti alla fine dell'analisi non si discostano per più del 5% dal valore ottenuto nelle 24 ore precedenti.

La principale differenza tra i due metodi di elaborazione sta nel numero di misure necessarie per operare una valutazione corretta: per calcolare la conduttanza e la trasmittanza con il metodo delle medie progressive si utilizzano «opportuni valori medi temporali delle grandezze monitorate, che devono essere determinati sulla base di un periodo di rilievo sufficientemente lungo»⁹² mentre, essendo il metodo “black-box” una tecnica di valutazione puramente numerica, richiede tempi di monitoraggio più brevi.

⁹² Lucchi, Elena, *Diagnosi energetica strumentale degli edifici: Termografia e analisi non distruttive, Normativa e procedure operative*, Palermo: Dario Flaccovio, 2012.

Casa Muratore

Luogo: Alba (TO)

Progettista/i: Studio di architettura *Case di paglia*

Data origine costruzione: circa 1960

Anno realizzazione intervento: 2018

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: cappotto ancorato a telaio in legno

Contesto: suburbano

Realizzazione: autocostruzione e impresa di costruzione

Si tratta di un'abitazione privata degli anni '60 situata a Carpaneta, località di Alba, e ristrutturata in un periodo compreso tra il 2017 e il 2018.

I lavori, a cura di Alessandro Veglio ed Erica Castagno, titolari dello studio di architettura *Case di paglia*, prevedevano:

- la riconfigurazione degli ambienti interni, per renderli più confortevoli e adeguati alle esigenze di una giovane famiglia;
- la realizzazione di una nuova terrazza dotata di rampa, esposta a sud e adiacente alla zona giorno, che diventa l'ingresso principale dell'abitazione;
- la realizzazione di una serra solare sfruttando la risega dell'edificio esistente.

Inoltre, per migliorare le prestazioni dell'involucro si è provveduto a:

- isolare termicamente con materassini in fibre tessili riciclate il sottotetto non abitabile;
- sostituire i vecchi infissi con serramenti in alluminio;
- applicare un cappotto isolante in sughero su parte del fronte Nord-Est;
- applicare un cappotto isolante in fibra di canapa sul fronte Nord-Ovest e Sud-Est;
- applicare un cappotto isolante in balle di paglia sul fronte Sud-Ovest



Fig. 108 Casa Muratore, fronte Sud-Ovest.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Fig. 109, Fig. 110 Casa Muratore, fronte Nord-Est.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno

e parte del fronte Nord-Est.

Nello specifico, le balle di paglia sono state posizionate all'interno di un telaio in legno ancorato tramite viti e staffe alla parete esistente. Le balle, spesse 45 cm, larghe 95 cm e posizionate di piatto, sono state sagomate in alcuni punti come in corrispondenza delle aperture, nei quali il passo del telaio non poteva essere rispettato. Per sollevare il cappotto in paglia dal terreno è stato eretto un supporto costituito da blocchetti di cemento distanziati di 30 cm dalla parete esistente: lo spazio tra i due elementi è stato riempito in argilla espansa e la parete esistente è stata rivestita da una guaina impermeabilizzante. Il supporto prosegue sotto il livello del terreno per circa 50 cm al fine di garantire maggiore stabilità al cappotto. Inoltre, tra il primo corso di balle di paglia e il cordolo di fondazione è stata inserita una basetta in legno riempita anch'essa con argilla espansa. La scelta del cappotto in balle di paglia è stata favorita dalla presenza del tetto sufficientemente sporgente e da una distanza adeguata dai confini della proprietà.

Le pareti sono state successivamente rivestite con un intonaco di calce di 2 cm, a sua volta applicato su una rete portaintonaco.



Fig. 111 Casa Muratore: il telaio in legno.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A. Veglio ed E. Castagno



Fig. 112 Casa Muratore: l'applicazione delle balle di paglia.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A. Veglio ed E. Castagno



Fig. 113 Casa Muratore: il cordolo di fondazione.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



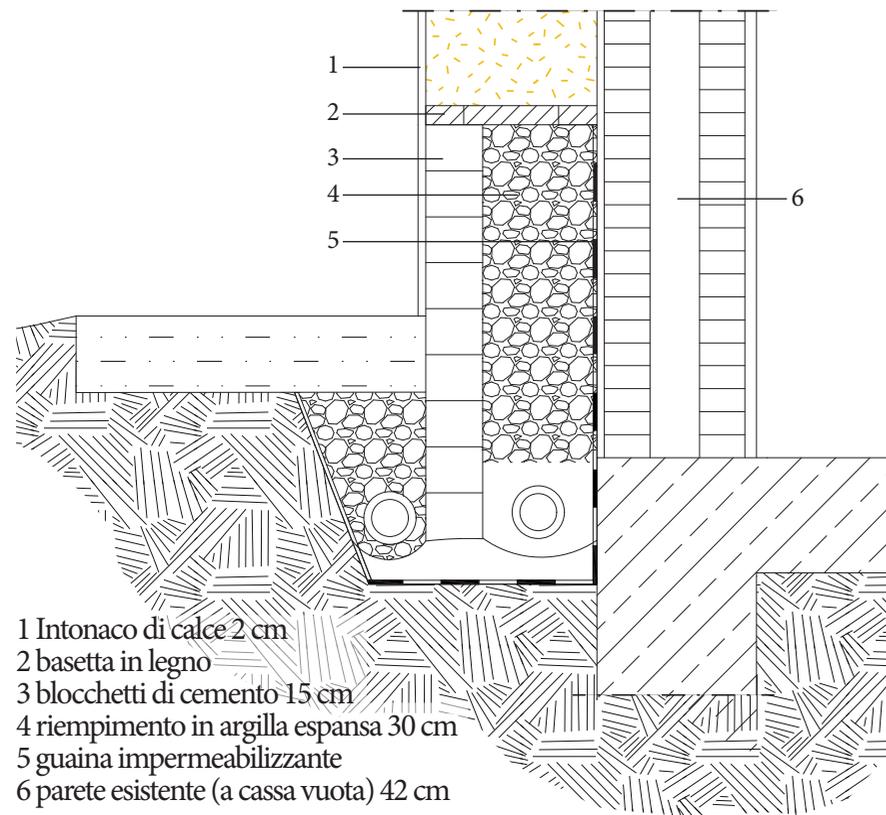
Fig. 114 Casa Muratore: la basetta in legno applicata sul cordolo di fondazione.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



Fig. 115 Casa Muratore durante i lavori di riqualificazione.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno

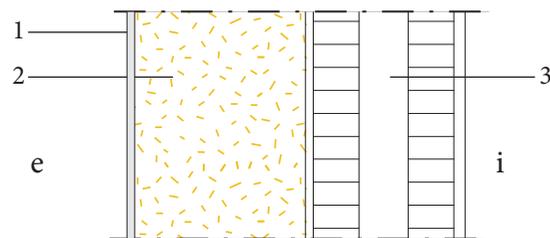


Fig. 116 Casa Muratore al termine dei lavori di riqualificazione.
Fonte: Fotografia concessa dagli arch. A.Veglio ed E.Castagno



- 1 Intonaco di calce 2 cm
- 2 basetta in legno
- 3 blocchetti di cemento 15 cm
- 4 riempimento in argilla espansa 30 cm
- 5 guaina impermeabilizzante
- 6 parete esistente (a cassa vuota) 42 cm

Fig. 117 Dettaglio del cordolo di fondazione del cappotto in paglia scala 1:20.
Disegno concesso dagli arch. A. Veglio e E. Castagno



- 1 Intonaco di calce 2 cm
- 2 Isolamento in paglia 45 cm
- 3 Parete esistente (a cassa vuota) 42 cm

Fig. 118 Dettaglio del cappotto in paglia scala 1:20.
Disegno concesso dagli arch. A. Veglio e E. Castagno

La campagna di misure

La campagna di misure si è svolta in un periodo di tempo compreso tra il 5 febbraio 2020 e il 10 febbraio 2020. La strumentazione necessaria al rilievo è stata posizionata sulla parete Nord-Est, più precisamente in corrispondenza della camera da letto matrimoniale, dopo aver verificato le seguenti condizioni:

- assenza di irregolarità termiche come ponti termici, sorgenti di calore e serramenti;
- assenza di irraggiamento diretto;
- assenza di irregolarità non visibili (attraverso l'uso della termocamera).

Periodo di acquisizione: 05/02/2020 - 10/02/20

Intervallo di campionamento: 10 minuti

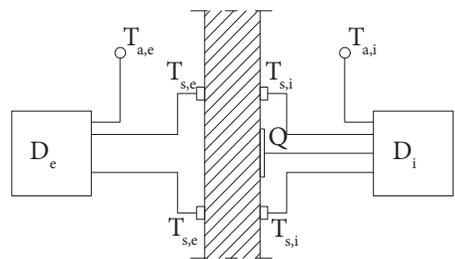
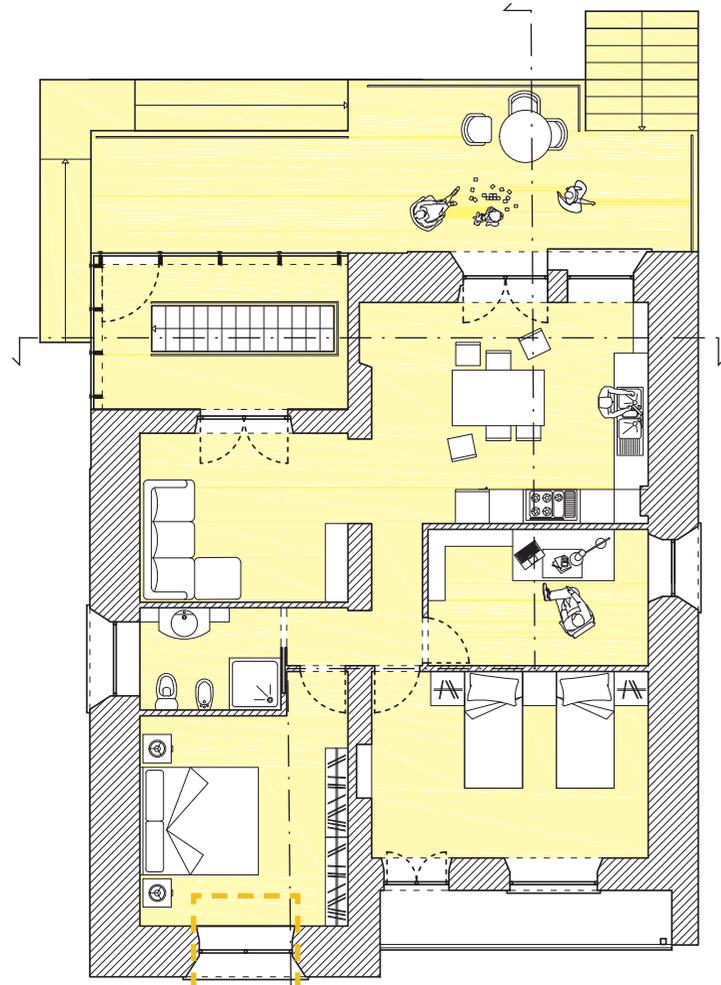
Numero acquisizioni: 667



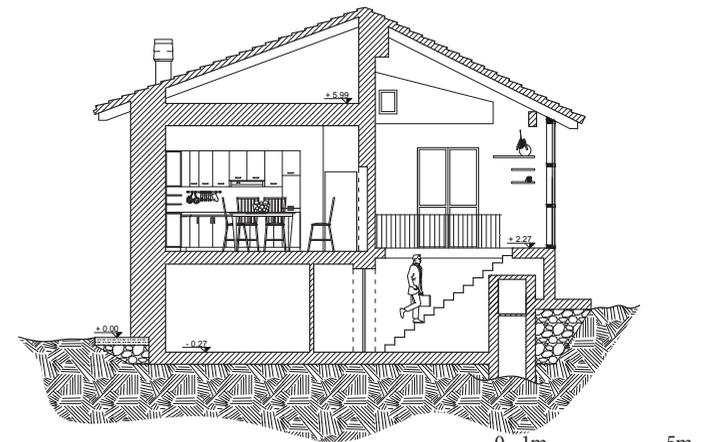
Fig. 119 Sonde applicate sul fronte interno della parete Nord-Est.

Fig. 120 Sonde applicate sul fronte esterno della parete Nord-Est.

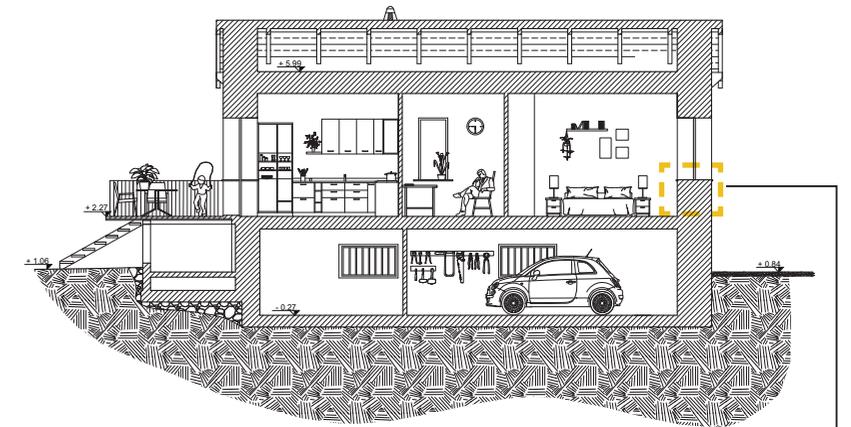
0 1m 5m
 Disegno concesso dagli arch. A. Veglio e E. Castagno



D_i = datalogger interno
 Q = flusso termico (W/m^2)
 $T_{a,i}$ = temperatura dell'aria interna ($^{\circ}C$)
 $T_{a,e}$ = temperatura dell'aria esterna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,i}$ = temperatura superficiale della parete interna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,e}$ = temperatura superficiale della parete esterna ($^{\circ}C$)

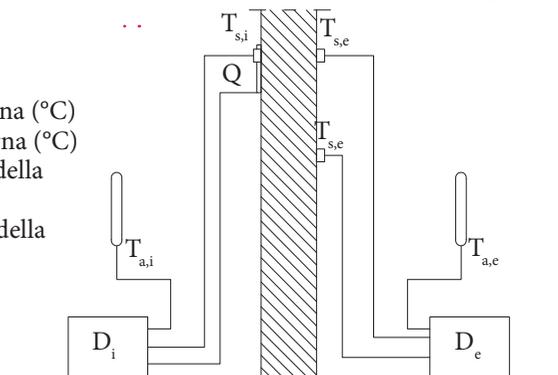


Sezione trasversale
 Disegno concesso dagli arch. A. Veglio e E. Castagno



Sezione longitudinale
 Disegno concesso dagli arch. A. Veglio e E. Castagno

D_i = datalogger interno
 Q = flusso termico (W/m^2)
 $T_{a,i}$ = temperatura dell'aria interna ($^{\circ}C$)
 $T_{a,e}$ = temperatura dell'aria esterna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,i}$ = temperatura superficiale della parete interna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,e}$ = temperatura superficiale della parete esterna ($^{\circ}C$)



La trasmittanza termica misurata

Di seguito sono riportati, sotto forma di grafico, i valori istantanei ottenuti a seguito della campagna di misure.

Sono stati selezionati solamente i valori utili ai fini del calcolo della trasmittanza termica: flusso termico (Q) misurato in W/m^2 , temperatura dell'aria interna ($T_{a,i}$) e temperatura dell'aria esterna ($T_{a,e}$) misurate in $^{\circ}C$.



Fig. 121 Grafico dell'andamento del *flusso termico istantaneo* Q [W/m^2].

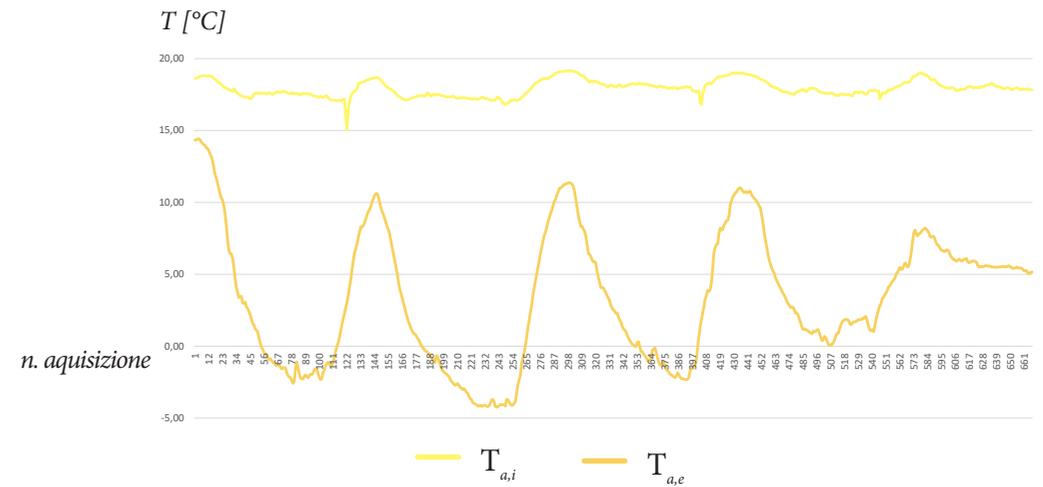


Fig. 122 Grafico dell'andamento delle *temperature dell'aria istantanea* $T_{a,i}$ e $T_{a,e}$ [$^{\circ}C$].

Il grafico seguente riporta i valori istantanei di trasmittanza, calcolati sulla base dei dati appena riportati attraverso la formula:

$$U = \frac{q}{T_{a,i} - T_{a,e}}$$

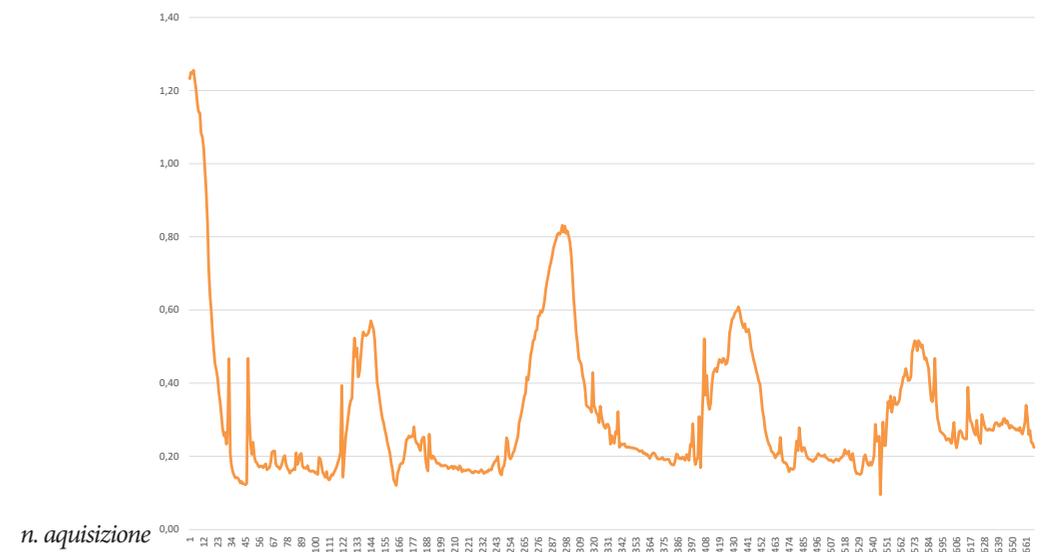


Fig. 123 Grafico dell'andamento della *trasmittanza termica istantanea* U [W/m^2K].

Sulla base dei dati ricavati dalle misure in campo e attraverso l'applicazione del *metodo della media mobile*, è stato ricavato il valore finale di trasmittanza termica della parete in esame corrispondente a:

$$U = 0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Di seguito si riporta, sotto forma di grafico, l'andamento della trasmittanza termica calcolata con il *metodo della media mobile*.

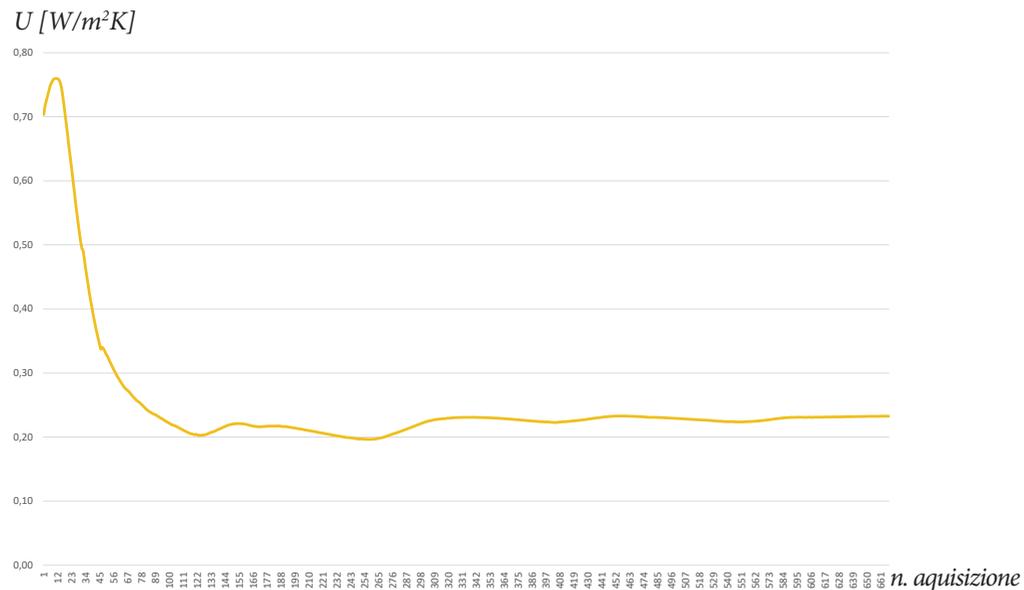


Fig. 124 Grafico dell'andamento della *trasmittanza termica* U [$\text{W/m}^2\text{K}$] calcolata con il metodo della media mobile.

Si nota che con il passare dei giorni il valore della trasmittanza termica tende a stabilizzarsi intorno al valore di $U=0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$. Inoltre, è stato verificato che il valore ottenuto alla fine del periodo di monitoraggio non si discosta per più del 5% dal valore ottenuto nelle 24 ore precedenti, per cui la prova può essere ritenuta valida.

Dal valore misurato della trasmittanza termica U è stato ricavato il valore della conducibilità termica λ [W/mK] della paglia attraverso la seguente uguaglianza:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{s_n}{\lambda_n} + R_{se}}$$

Dove:

U = Trasmittanza termica [$\text{W/m}^2\text{K}$]

R_{si} = resistenza liminare della superficie interna della struttura [$\text{m}^2\text{K/W}$]

s_n / λ_n = resistenza termica degli n materiali omogenei che compongono la struttura [$\text{m}^2\text{K/W}$]

R_{se} = resistenza liminare della superficie esterna della struttura [$\text{m}^2\text{K/W}$]

$$0,22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = \frac{1}{0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + \frac{0,002 \text{ m}}{0,7 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,25 \text{ m}}{0,4 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,01 \text{ m}}{1,4 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,12 \text{ m}}{0,387 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,02 \text{ m}}{0,9 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,45 \text{ m}}{\lambda_{\text{paglia}} \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,03 \text{ m}}{0,8 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}}$$

U misurata

R_{si}

R intonaco interno

R malta di cemento

R mattoni semipieni

R mattoni forati

R intonaco esterno

R paglia

R intonaco di calce e sabbia

R_{se}

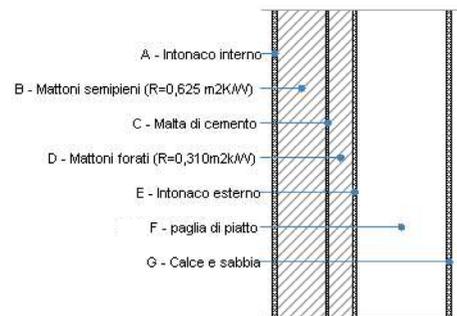
Si ricava il valore di conducibilità termica della paglia λ corrispondente a:

$$\lambda = 0,13 \text{ W/mK}^{93}$$

⁹³ in linea con i valori riscontrati in bibliografia (secondo capitolo *L'impiego della paglia in architettura*, sezione *Le proprietà fisiche della paglia* p. 86).

La trasmittanza termica calcolata

La trasmittanza termica della parete in esame è stata calcolata con il software Termolog Epix 10⁹⁴ inserendo come conducibilità termica della paglia il valore utilizzato dai progettisti: $\lambda=0,07$ W/mK. Di seguito è riportata la schermata di output del programma, in cui sono evidenziati i valori di trasmittanza termica e conducibilità termica.



Le proprietà termiche dell'elemento opaco sono valutate in base alla UNI EN ISO 6946.

DATI DELLA STRUTTURA OPACA

Nome: sottofinestra	Disposizione: Verticale
Note:	Spessore: 900,0 mm
Tipologia: Parete	Resistenza R: 7,629 (m ² K)/W
Verso: Esterno	Colore: Chiaro
Trasmittanza U: 0,131 W/(m ² K)	
Massa superf.: 473 Kg/m ²	
Area: - m ²	

STRATIGRAFIA

Strato	Spessore s [mm]	Conducibilità λ [W/(mK)]	Resistenza R [(m ² K)/W]	Densità ρ [Kg/m ³]	Capacità term. C [kJ/(kgK)]	Fattore μ_a [-]	Fattore μ_u [-]
Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-	-
A Intonaco interno	20,0	0,700	0,029	1,400	1,00	11,1	11,1
B Mattoni semipieni (R=0,625 m2K/W)	250,0	0,400	0,625	1,000	1,00	5,6	5,6
C Malta di cemento	10,0	1,400	0,007	2,000	1,00	16,7	16,7
D Mattoni forati (R=0,310m2k/W)	120,0	0,387	0,310	800	1,00	10,0	5,0
E Intonaco esterno	20,0	0,900	0,022	1,800	1,00	16,7	16,7
F paglia di piatto	450,0	0,070	6,429	130	2,00	3,0	3,0
G Calce e sabbia	30,0	0,800	0,038	1,600	1,00	10,0	6,0
Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-	-
TOTALE	900,0		7,629				

Conduttanza unitaria superficiale interna: 7,690 W/(m ² K)	Resistenza unitaria superficiale interna: 0,130 (m ² K)/W
Conduttanza unitaria superficiale esterna: 25,000 W/(m ² K)	Resistenza unitaria superficiale esterna: 0,040 (m ² K)/W

VERIFICA DI TRASMITTANZA

Verifica di trasmittanza (non considerando l'influenza di eventuali ponti termici non corretti):

Comune: Alba	Zona climatica: E
Trasmittanza della struttura U: 0,131 W/(m ² K)	Trasmittanza limite U _{lim} : 0,300 W/(m ² K)

Riferimento normativo: Limiti relativi alla Normativa Nazionale Legge 90
 ESITO VERIFICA DI TRASMITTANZA: OK

Confronto trasmittanza misurata e trasmittanza calcolata

Dal confronto dei risultati ottenuti a seguito della misura in campo e della simulazione termoigrometrica si evince che i valori misurati si discostano dai valori calcolati.

	U (W/m ² K)	λ (W/mK)
Misura in campo	0,220	0,13
Simulazione	0,131	0,07
Variazione %	- 69%	-85%

Fig. 125 Confronto tra i valori di trasmittanza e conducibilità misurati e calcolati.

Invece, confrontando il valore di conducibilità termica misurato con i valori solitamente utilizzati dagli architetti intervistati si nota che il valore misurato risulta più alto.

Architetti intervistati	λ (W/mK)
Arch. Caggiano	Normativa francese/tedesca/americana, abachi CasaClima
Arch. Fassi	0,06
Arch. Macri e Mancuso	0,0532 (FASBA)
Arch. Preti	Schede tecniche
Arch. Veglio e Castagno	letteratura

Fig. 126 I valori di conducibilità termica utilizzati dai progettisti intervistati.

Le suddette variazioni potrebbero essere dovute alle da condizioni ambientali reali diverse da quelle considerate in fase di progetto.

Casa Cembo

Luogo: Saluggia (VC)

Progettista/i: Studio di architettura *Macrì-Mancuso*

Anno realizzazione: 2012-2015

Tipologia edificio: edificio monofamiliare

Tecnica costruttiva: Post and Beam + Infill

Contesto: suburbano

Realizzazione: autocostruzione

Si tratta di un'abitazione privata di 162 m², progettata dagli architetti M. Macrì e S. Mancuso e realizzata in autocostruzione in un periodo compreso tra il 2012 e il 2015. Il processo di autocostruzione è frutto di una collaborazione tra i progettisti, il proprietario e figure non specializzate nel settore edile ma istruiti in cantiere dai progettisti.

L'edificio è composto da un telaio strutturale in legno tamponato da balle di paglia (sistema *Post and Beam*) e solo per due porzioni è stata utilizzata la tecnica costruttiva denominata *Infill*, mentre i divisori sono realizzati in terra-paglia.

Per la porzione di edificio realizzato con la tecnica *Post and Beam* (Fig. 111) le balle di paglia sono state posizionate di piatto, per uno spessore di 48 cm, mentre per quanto riguarda la struttura portante, i pilastri si presentano di sezione ridotta rispetto allo spessore del muro (22 cm contro i 55 cm del muro) e sono completamente incorporati tra le balle di paglia. La parete è stata successivamente rivestita con degli strati di intonaco dallo spessore totale di 3,5 cm per lato. Più precisamente, per il fronte esterno è stato utilizzato un intonaco composto da tre strati: i primi due sono costituiti da stucco a calce, metacaolino, sabbia e paglia mentre l'ultimo strato, di spessore ridotto rispetto ai precedenti, è costituito da stucco a calce, sabbia e frammenti di terracotta o mattone (come agente idraulico e colorante) ed è stato



Fig. 127 Casa Cembo
Fonte: Fotografia dell'autore, 2019.



Fig. 128 Casa Cembo, fronte sud-ovest
Fonte: Fotografia concessa dal laboratorio LAMSA del Politecnico di Torino.

applicato solo quando i primi due strati risultavano completamente asciutti. Per il fronte interno, invece, è stato utilizzato un intonaco in terra cruda e solo il bagno è stato rivestito in cocciopesto.

Il sistema costruttivo conosciuto come *Infill* (Fig.112) è stato utilizzato per le pareti della cucina e della zona dove, da progetto, era stato previsto il laboratorio di falegnameria. I montanti verticali sono posizionati ad un interasse di 45 cm in modo da poter ospitare le balle di paglia posizionate di coltello e, sul lato interno sono stati irrigiditi con un pannello OSB. Mentre, per il lato esterno sono stati applicati un pannello Eraclit (lana di legno mineralizzata con magnesite) e un pannello Aquapanel (cemento rinforzato).

Sul lato Sud è presente una serra solare che permette di sfruttare al meglio i guadagni solari durante l'inverno e, durante i mesi estivi, di creare un flusso continuo di aria permettendo così il raffrescamento naturale dell'abitazione.



Fig. 129 Casa Cembo durante i lavori di costruzione
Fonte: flickr.com



Fig. 130 Casa Cembo durante i lavori di costruzione
Fonte: flickr.com

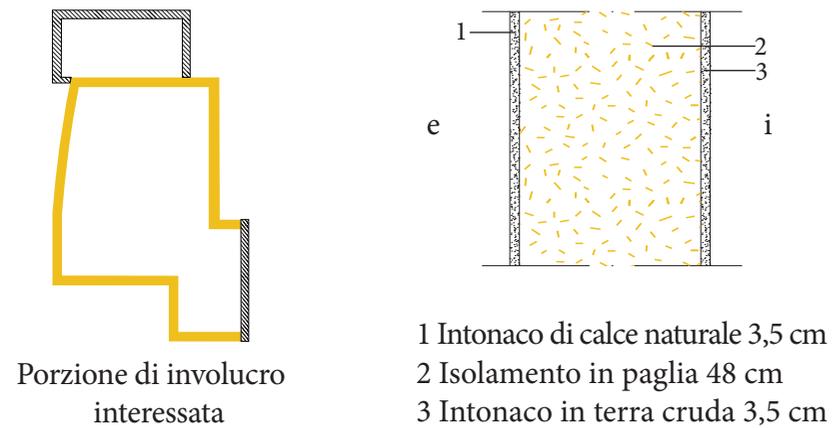


Fig. 131 Tecnica costruttiva *Post and Beam*, porzione di involucro interessata e stratigrafia scala 1:20.

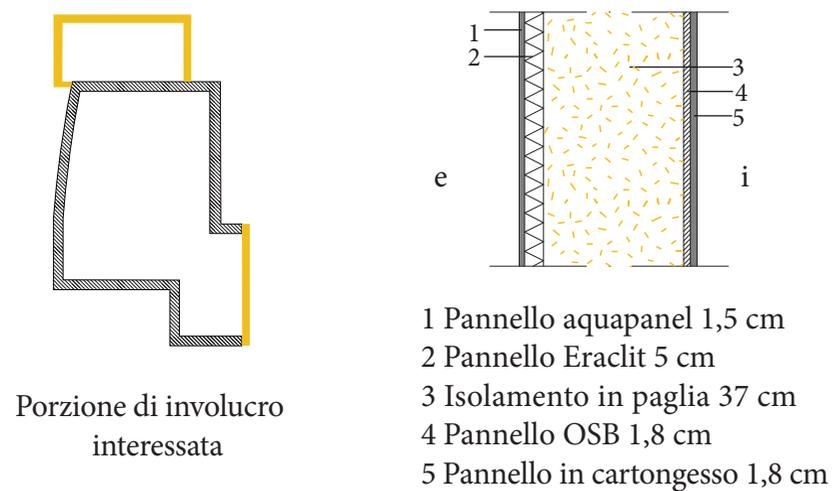


Fig. 132 Tecnica costruttiva *Infill*, porzione di involucro interessata e stratigrafia scala 1:20.

La campagna di misure

La campagna di misure si è svolta in un periodo di tempo compreso tra il 23 gennaio 2019 e il 30 gennaio 2019. La strumentazione necessaria al rilievo è stata posizionata sulla parete nord- ovest, più precisamente in corrispondenza dell'ambiente soggiorno, dopo aver verificato le seguenti condizioni:

- assenza di irregolarità termiche come ponti termici, sorgenti di calore e serramenti;
- assenza di irraggiamento diretto;
- assenza di irregolarità non visibili (attraverso l'uso della termocamera).

Periodo di acquisizione: 23/01/2019 - 30/01/2019

Intervallo di campionamento: 10 minuti

Numero acquisizioni: 999

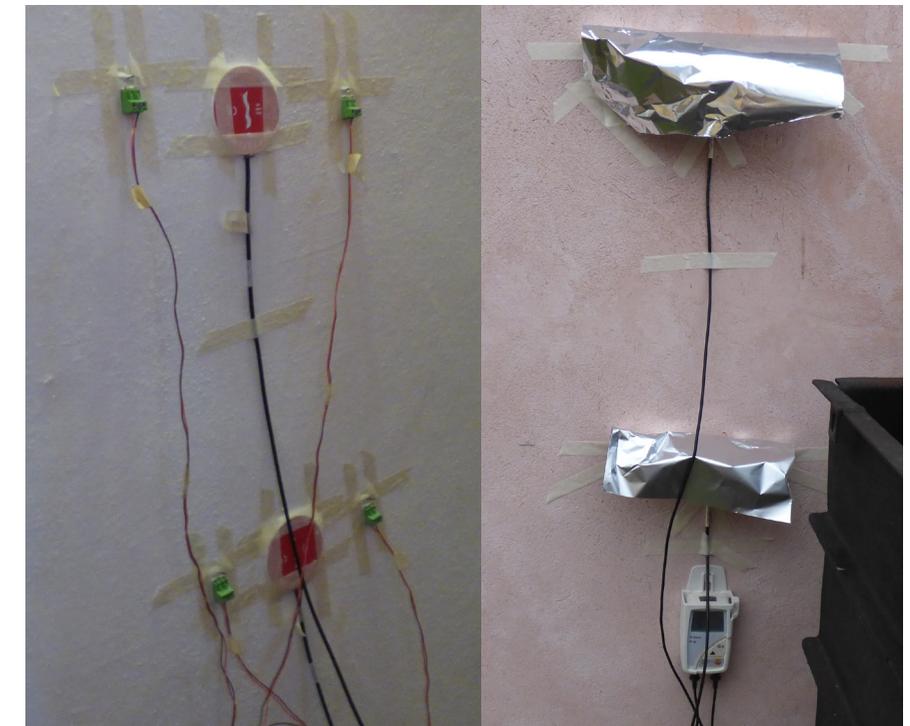
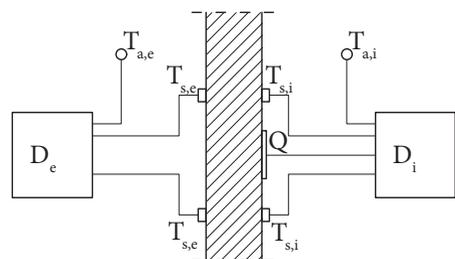
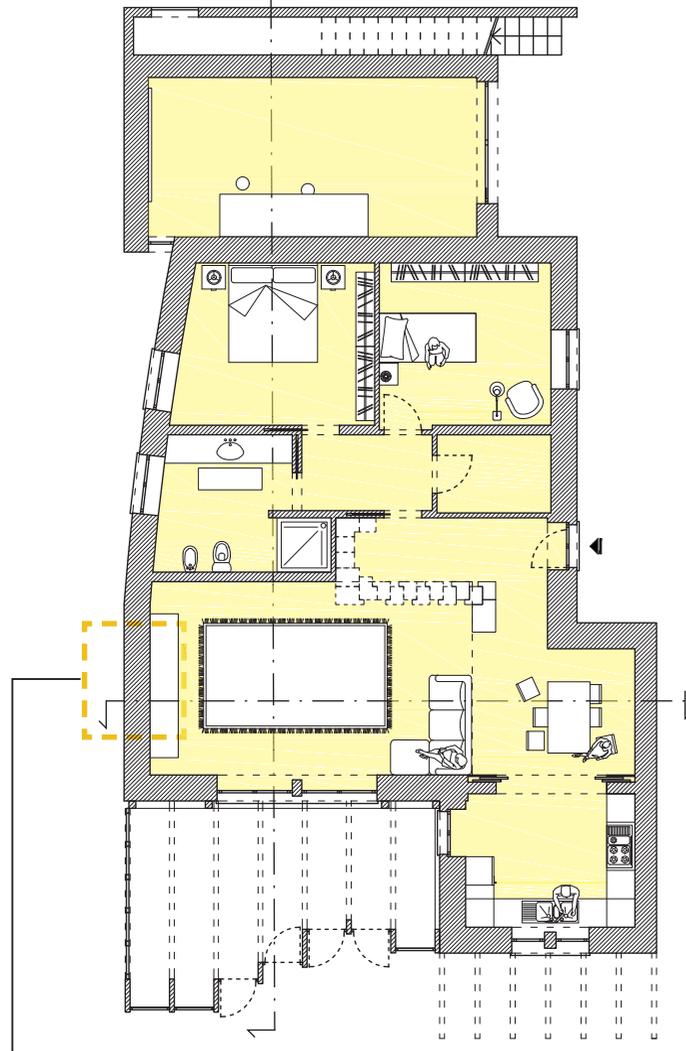


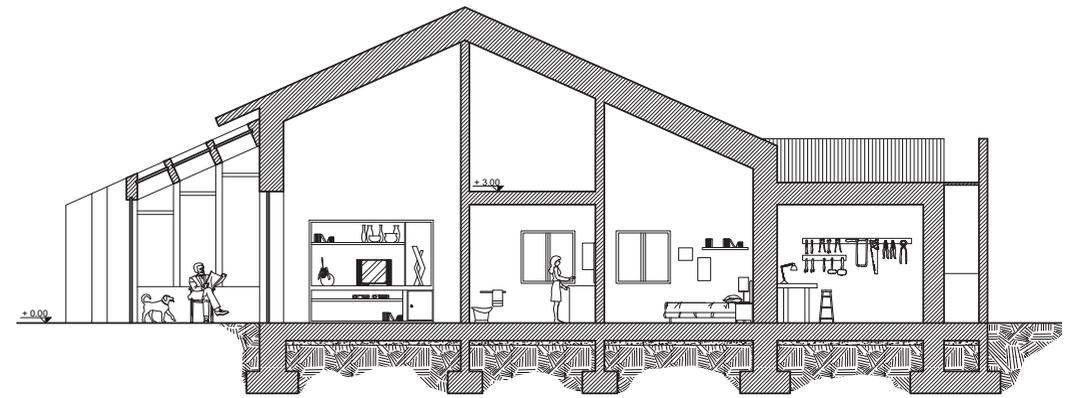
Fig. 133 Sonde applicate sul fronte interno della parete Nord-ovest.

Fig. 134 Sonde applicate sul fronte esterno della parete Nord-ovest.

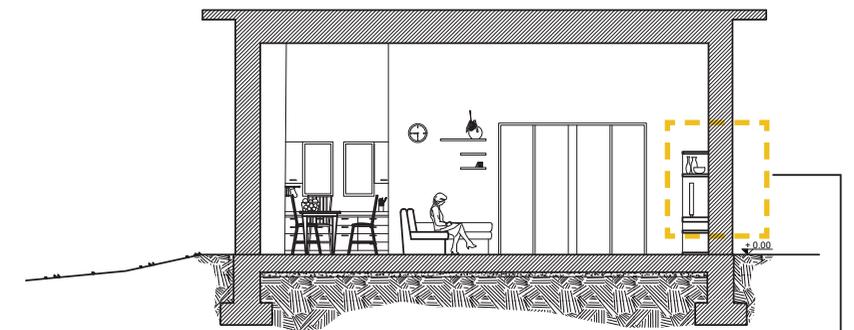
0 1m 5m
 Disegno concesso dagli arch. M.Macri e S.Mancuso



D_i = datalogger interno
 Q = flusso termico (W/m^2)
 $T_{a,i}$ = temperatura dell'aria interna ($^{\circ}C$)
 $T_{a,e}$ = temperatura dell'aria esterna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,i}$ = temperatura superficiale della parete interna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,e}$ = temperatura superficiale della parete esterna ($^{\circ}C$)

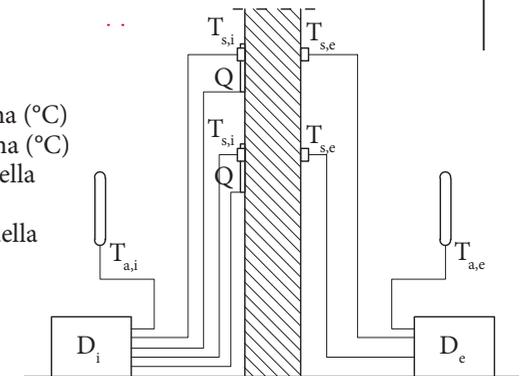


Sezione longitudinale
 Disegno concesso dagli arch. M.Macri e S.Mancuso



Sezione trasversale
 Disegno concesso dagli arch. M.Macri e S.Mancuso

D_i = datalogger interno
 Q = flusso termico (W/m^2)
 $T_{a,i}$ = temperatura dell'aria interna ($^{\circ}C$)
 $T_{a,e}$ = temperatura dell'aria esterna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,i}$ = temperatura superficiale della parete interna ($^{\circ}C$)
 $T_{p,e}$ = temperatura superficiale della parete esterna ($^{\circ}C$)



La trasmittanza termica misurata

Di seguito sono riportati, sotto forma di grafico, i valori istantanei ottenuti a seguito della campagna di misure.

Sono stati selezionati solamente i valori utili ai fini del calcolo della trasmittanza termica: flusso termico (Q) misurato in W/m^2 , temperatura dell'aria interna ($T_{a,i}$) e temperatura dell'aria esterna ($T_{a,e}$) misurate in $^{\circ}C$.

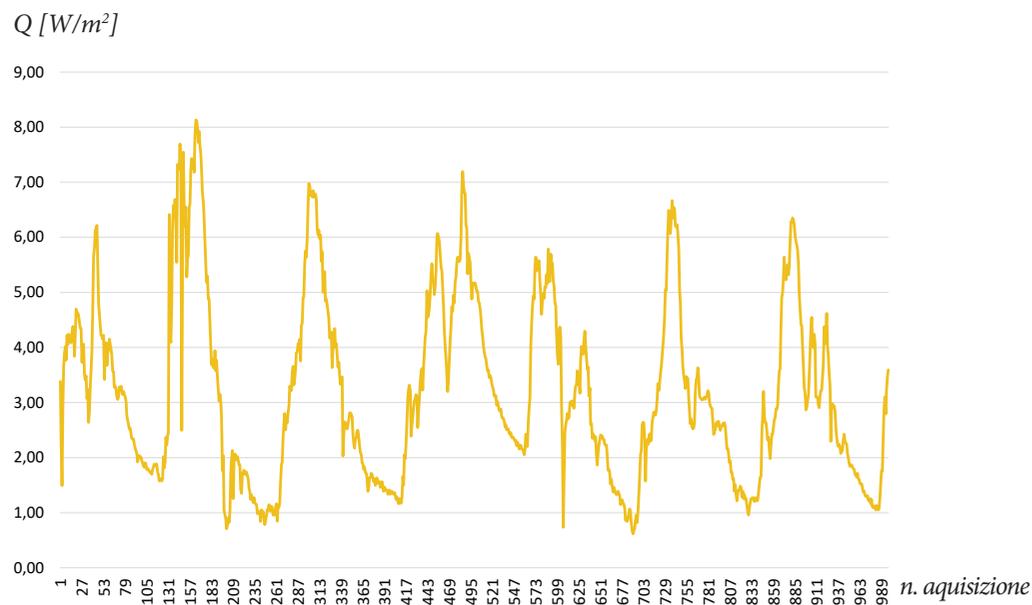


Fig. 135 Grafico dell'andamento del *flusso termico istantaneo* Q [W/m^2].

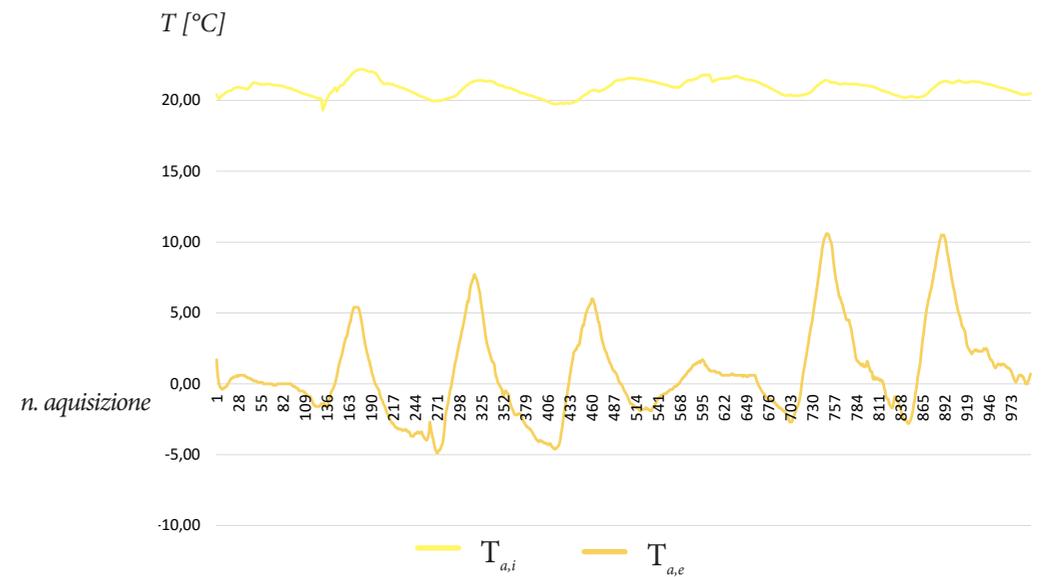


Fig. 136 Grafico dell'andamento delle *temperature dell'aria istantanea* $T_{a,i}$ e $T_{a,e}$ [$^{\circ}C$].

Il grafico seguente riporta i valori istantanei di trasmittanza, calcolati sulla base dei dati appena riportati attraverso la formula:

$$U = \frac{q}{T_{a,i} - T_{a,e}}$$

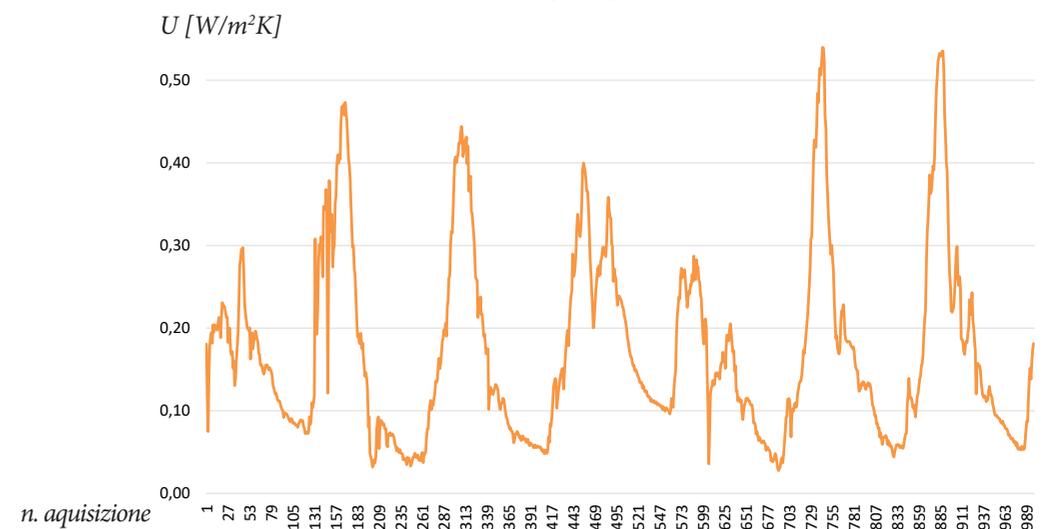


Fig. 137 Grafico dell'andamento della *trasmittanza termica istantanea* U [W/m^2K].

Sulla base dei dati ricavati dalle misure in campo e attraverso l'applicazione del *metodo della media mobile*, è stato ricavato il valore finale di trasmittanza termica della parete in esame corrispondente a:

$$U = 0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Di seguito si riporta, sotto forma di grafico, l'andamento della trasmittanza termica calcolata con il *metodo della media mobile*.

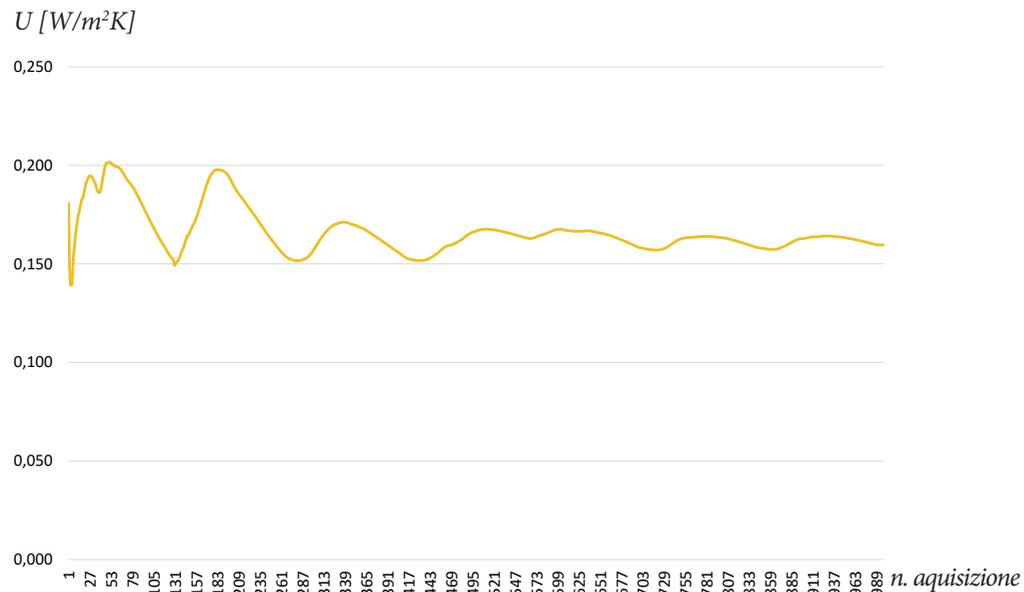


Fig. 138 Grafico dell'andamento della *trasmittanza termica* U [$\text{W/m}^2\text{K}$] calcolata con il metodo della media mobile.

Si nota che con il passare dei giorni il valore della trasmittanza termica tende a stabilizzarsi intorno al valore di $U=0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$. Inoltre, è stato verificato che il valore ottenuto alla fine del periodo di monitoraggio non si discosta per più del 5% dal valore ottenuto nelle 24 ore precedenti, per cui la prova può essere ritenuta valida.

Dal valore misurato della trasmittanza termica U è stato ricavato il valore della conducibilità termica λ [W/mK] della paglia attraverso la seguente uguaglianza:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{s_n}{\lambda_n} + R_{se}}$$

Dove:

U = Trasmittanza termica [$\text{W/m}^2\text{K}$]

R_{si} = resistenza liminare della superficie interna della struttura [$\text{m}^2\text{K/W}$]

s_n / λ_n = resistenza termica degli n materiali omogenei che compongono la struttura [$\text{m}^2\text{K/W}$]

R_{se} = resistenza liminare della superficie esterna della struttura [$\text{m}^2\text{K/W}$]

$$0,16 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = \frac{1}{0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + \frac{0,035 \text{ m}}{0,0704 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,48 \text{ m}}{\lambda_{\text{paglia}} \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,035 \text{ m}}{0,0737 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}}$$

$U \text{ misurata}$ R_{si} $R \text{ intonaco in terra cruda}$ $R \text{ paglia}$ $R \text{ intonaco in calce}$ R_{se}

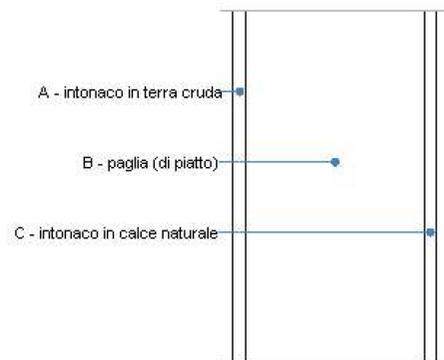
Si ricava il valore di conducibilità termica della paglia λ corrispondente a:

$$\lambda = 0,08 \text{ W/mK}^{95}$$

⁹⁵ in linea con i valori riscontrati in bibliografia (secondo capitolo *L'impiego della paglia in architettura*, sezione *Le proprietà fisiche della paglia* p. 86).

La trasmittanza termica calcolata

La trasmittanza termica della parete in esame è stata calcolata con il software Termolog Epix 10⁹⁶ inserendo come conducibilità termica della paglia il valore da bibliografia⁹⁷: $\lambda=0,07$ W/mK. Di seguito è riportata la schermata di output del programma, in cui sono evidenziati i valori di trasmittanza termica e conducibilità termica.



Le proprietà termiche dell'elemento opaco sono valutate in base alla UNI EN ISO 6946.

DATI DELLA STRUTTURA OPACA							
Nome: chiusura perimetrale							
Note:							
Tipologia: Parete	Disposizione: Verticale						
Verso: Esterno	Spessore: 550,0 mm						
Trasmittanza U: 0,121 W/(m ² K)	Resistenza R: 8,267 (m ² K)/W						
Massa superf.: 50 Kg/m ²	Colore: Chiaro						
Area: - m ²							
STRATIGRAFIA							
Strato	Spessore s [mm]	Conducibilità λ [W/(mK)]	Resistenza R [(m ² K)/W]	Densità ρ [Kg/m ³]	Capacità term. C [kJ/(kgK)]	Fattore μ_a [-]	Fattore μ_u [-]
Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-	-
A intonaco in terra cruda	35,0	0,704	0,050	1.800	1,00	10,0	10,0
B paglia (di piatto)	480,0	0,060	8,000	104	2,00	3,0	3,0
C intonaco in calce naturale	35,0	0,737	0,047	1.400	0,84	6,0	6,0
Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-	-
TOTALE	550,0		8,267				
Conduttanza unitaria superficiale interna: 7,690 W/(m ² K)		Resistenza unitaria superficiale interna: 0,130 (m ² K)/W					
Conduttanza unitaria superficiale esterna: 25,000 W/(m ² K)		Resistenza unitaria superficiale esterna: 0,040 (m ² K)/W					

96 Logical Soft (www.logical.it)

97 Per il valore di conducibilità termica adottato si fa riferimento al secondo capitolo *L'impiego della paglia in architettura*, sezione *Le proprietà fisiche della paglia* p. 86.

Confronto trasmittanza misurata e trasmittanza calcolata

Dal confronto dei risultati ottenuti a seguito della misura in campo e della simulazione termoigrometrica si evince che i valori misurati si discostano lievemente dai valori calcolati.

	U (W/m ² K)	λ (W/mK)
Misura in campo	0,160	0,08
Simulazione	0,121	0,06
Variazione %	- 32%	-33%

Fig. 139 Confronto tra i valori di trasmittanza e conducibilità misurati e calcolati.

Invece, confrontando il valore di conducibilità termica misurato con i valori solitamente utilizzati dagli architetti intervistati si nota che il valore misurato risulta più alto.

Architetti intervistati	λ (W/mK)
Arch. Caggiano	Normativa francese/tedesca/americana, abachi CasaClima
Arch. Fassi	0,06
Arch. Macri e Mancuso	0,0532 (FASBA)
Arch. Preti	Schede tecniche
Arch. Veglio e Castagno	letteratura

Fig. 140 I valori di conducibilità termica utilizzati dai progettisti intervistati.

Le suddette variazioni potrebbero essere dovute alle da condizioni ambientali reali diverse da quelle considerate in fase di progetto.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha affrontato, in una prima parte, il discorso sulla sostenibilità e ha introdotto la paglia impiegata nell'ambito delle costruzioni. Gli ultimi capitoli, dal carattere applicativo, sono dedicati alle interviste e alle misure in campo di trasmittanza termica.

Dal questionario rivolto ai professionisti è emerso che questi ultimi si ritengono poco competenti ma allo stesso tempo favorevoli all'impiego della paglia in architettura. Inoltre, la mancanza di una normativa specifica li frena nello scegliere questo materiale per i loro progetti.

Dalle interviste ai professionisti specializzati si evince che nonostante i problemi che devono quotidianamente affrontare continuano a fare promozione e diffondere questa cultura, nella speranza che in un futuro non troppo lontano diventi una tecnica costruttiva impiegata e considerata allo stesso modo dei sistemi tradizionali.

Da parte delle persone non specializzate l'ostacolo principale è la disinformazione. Quest'ultima porta alla persistenza di pregiudizi e timori infondati e, di conseguenza, alla difficoltà nel riconoscere altrettanto validi sistemi costruttivi diversi da quelli tradizionali.

Nella pagina successiva è presente una tabella che riporta l'analisi SWOT effettuata ai fini di riportare i risultati delle indagini evidenziandone i punti di forza, i punti di debolezza, le opportunità e i rischi derivanti dall'impiego della paglia in architettura. Dalle misure di trasmittanza termica in opera si evincono degli scostamenti tra i valori di conducibilità termica che utilizzano gli architetti ($\lambda=0,06-0,07$ W/mK) e i valori misurati. In Italia, la mancanza di una normativa costringe i professionisti che si apprestano ad utilizzare la paglia a basarsi su valori provenienti da altri Paesi europei. Infatti, Paesi come l'Austria, la Germania e la Danimarca hanno promosso diversi studi, eseguiti secondo gli standard europei, volti a determinare la conducibilità termica delle balle di paglia e dai quali emergono i seguenti risultati:

- la prova svolta nel 2003 in Germania presso il *Forschungsinstitut für*

S

Strengths

- È un materiale economico, salubre, con ottime caratteristiche di isolamento termico.
- Il notevole spessore delle balle fornisce la massa opportuna a garantire un buon comportamento durante il periodo estivo.
- È un supporto facilmente intonacabile e non richiede l'impiego di tasselli o colle.
- È un materiale leggero quindi facilmente trasportabile senza l'ausilio di mezzi meccanici e lavorabile con attrezzi poco energivori e a basso grado di pericolosità.
- Si sostiene il rilancio dell'economia agricola locale.
- I professionisti hanno già sentito parlare di questa tecnica costruttiva e sono interessati a saperne di più.

W

Weaknesses

- Assenza di normativa.
- Attualmente non molto diffusa perché non è conosciuta.
- Edifici realizzati sono principalmente residenze ed edifici monofamiliare in contesti rurali.
- Scarsa sensibilità ambientale da parte delle persone non specializzate.
- Disinformazione diffusa riguardo a questa tecnica costruttiva tra le persone non specializzate.
- Mancanza di un sistema tecnologico ingegnerizzato.
- Carezza di manodopera specializzata e problemi riguardanti i cantieri cittadini.

O

Opportunities

- Promuovere sensibilizzazione attraverso il web, la tv, fiere ed eventi.
- Workshop e seminari aperti a tutti.
- Sviluppare un sistema tecnologico ingegnerizzato.
- Provvedere alla stesura di una normativa.

T

Threats

- Continuo intervenire principalmente in zone rurali.
- Persistente sfiducia nei confronti di questo sistema costruttivo, che potrebbe far sì che esso resti una nicchia dell'architettura.

Wärmeschutz dichiara una conducibilità termica $\lambda = 0,0379$ W/mK;
- la prova austriaca svolta nel 2000 dal *GrAT* (Gruppe Angepasste Technologie) dichiara una conducibilità termica $\lambda = 0,0380$ W/mK;
- la prova danese svolta nel 2001 dal *Danish Technological Institute* dichiara una conducibilità termica λ compresa tra 0,0520 e 0,0600 W/mK.

È plausibile che a questi valori i professionisti italiani, ragionando in maniera cautelativa come farebbe un qualsiasi tecnico, applichino una maggiorazione del 20-40% giustificando così i valori di conducibilità termica utilizzati ($\lambda=0,06-0,07$ W/mK).

Risulta evidente che c'è ancora della strada da compiere per poter stabilire un valore di conducibilità termica per le balle di paglia. Nel frattempo, una serie di monitoraggi su più casi studio, pianificati e costanti nel tempo, contribuirebbe non solo ad ampliare la bibliografia con dei dati recenti, ma porterebbe anche dei risultati utili alla stesura di una normativa.

Ringraziamenti

Un ringraziamento è rivolto alla mia relatrice, la prof.ssa Elena Montacchini, e alle mie correlatrici Maria Cristina Azzolino e Angela Lacirignola per la disponibilità e cortesia dimostratemi, per i preziosi consigli e le precise correzioni.

Ringrazio Gabriele Piccablotto per la sua professionalità, la costante disponibilità e l'aiuto fornitomi per l'utilizzo della strumentazione necessaria alla stesura di questa tesi.

Ringrazio gli Architetti Alessandro Veglio ed Erika Castagno per l'entusiasmo, l'interesse e la disponibilità dimostratomi nei confronti delle misure in campo.

Ringrazio gli Architetti Maurizio Macrì e Stefania Mancuso per la documentazione e per le informazioni fornitemi durante l'intervista e non.

Ringrazio gli Architetti Filippo Caggiano, Alessandro Fassi e Nicola Preti per il tempo che mi hanno concesso e le nozioni che mi hanno trasmesso durante le interviste.

Ringrazio il signor Claudio e la famiglia Muratore per la loro accoglienza e per aver messo a disposizione le loro case.

Ringrazio, infine, tutte le persone che hanno partecipato ai questionari on-line, le quali hanno permesso di realizzare una parte considerevole del presente elaborato.

Bibliografia

ANDIL, *La risposta dell'edilizia alla crisi energetica: atti del 12° congresso nazionale ANDIL*, Roma: ANDIL, 1974.

Angela, Piero e Lorenzo Pinna, *La sfida del secolo. Energia*, Milano: Mondadori, 2008.

Bartoli, Barbara, *La casa passiva*, Napoli: Sistemi Editoriali, 2010.

Bertolini, Nando (a cura di), *Bioarchitettura: le tesi di Ugo Sasso dalle parole ereditate sulla via italiana del costruire sostenibile*, Napoli: CLE-AN, 2016.

Boscolo, Marco e Kristian Fabbri, *Diagnosi energetica degli edifici: guida all'uso della strumentazione per il certificatore energetico*, Roma: DEI, 2009.

Calvino, Italo, *Le città invisibili*, Milano: Mondadori, 2014.

Canepa, Maria, *Riflessioni sullo sviluppo sostenibile in architettura: a trent'anni dal rapporto Brundtland*, Sesto San Giovanni (MI): Mimesis, 2018.

Cappello, Mauro, *Efficienza energetica degli edifici: guida agli interventi di riqualificazione energetica per accedere alle detrazioni fiscali*, Palermo: GRAFFIL, 2008.

Caramazza, Cesare, e Mario Butera, *Diagnosi energetica degli immobili e detrazioni del 55%*, Palermo: Dario Flaccovio Editore, 2010.

Della Posta, Pompeo, e Anna Maria Rossi, *Effetti, potenzialità e limiti della globalizzazione*, Milano: Springer, 2007.

Fabbri, Kristian, *Guida alla riqualificazione energetica*, Roma: Dei, 2007.

Fabbri, Kristian, *Risparmio energetico in edilizia*, Roma: Dei, 2012.

Ferrante, Annarita, A. A. A. *adeguamento, adattabilità, architettura: teorie e metodi per la riqualificazione architettonica, energetica ed ambientale del patrimonio edilizio esistente*, Milano: Bruno Mondadori, 2012.
Fiorito, Francesco, *Involucro edilizio e risparmio energetico*, Palermo: Flaccovio, 2009.

Flynn, James R., *Senza alibi: il cambiamento climatico: evitare la catastrofe*, Torino: Bollati Boringhieri, 2015 .

Gaspari, Jacopo, *Trasformare l'involucro: la strategia dell'addizione nel progetto di recupero*, Monfalcone (GO): Edicomedizioni, 2012.

Gerelli, Emilio e Luigi Bernardi, *È possibile in Italia una politica dell'energia?*, Milano: Franco Angeli, 1977.

Golini, Antonio, *Distribuzione della popolazione, migrazioni interne e urbanizzazione in Italia*, Istituto di Demografia, Roma, 1974.

Hodge, Brian, *Building your straw bale home*, San Francisco: Landlinks press, 2006.

Hollis, Murray, *Practical strawbale building*, Collingwood: Landlinks Press, 2005.

Indovina, Francesco, *La città diffusa all'arcipelago metropolitano*, Milano: FrancoAngeli, 2009.

Jones, Barbara, *Costruire con le balle di paglia: manuale pratico per la progettazione e la costruzione*, Firenze: Terra Nuova edizioni, 2014.

Lacinski, Paul, e Michel Bergeron, *Serious straw bale: a home con-*

struction guide for all climates, Chelsea Green: White river Junction, 2000.

Lantschner, Norbert, *Casaclima il piacere di abitare*, Bolzano: Athesia, 2007.

Lantschner, Norbert, *CasaClima: vivere nel più*, Bolzano: Raetia, 2007.

Lanzoni, Davide, *Diagnosi e certificazione energetica: prove sperimentali sugli edifici: termografia, blower door, termoflussimetro*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2010.

Lucchi, Elena, *Diagnosi energetica strumentale degli edifici: Termografia e analisi non distruttive, Normativa e procedure operative*, Palermo: Dario Flaccovio, 2012.

Lucchi, Elena, *Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio: diagnostica e interventi*, Palermo: Dario Flaccovio, 2014.

MacDonald, S.O., Matta Myhrman e Diana S. Mindlin, *Edifique con fardos: una guía paso a paso para la construcción con fardos de paja*, Argentina: Nobuko Sa, 2004.

Madia, Luigi e Gualtiero Giurovich, *Indagine sui fabbricati residenziali in Italia*, Milano: Giuffrè, 1966.

Magwood, Chris e Chris Walke, *Straw bale detail: a manual for designers and builders*, S.I.:New society, 2001.

Maugeri, Leonardo, *L'era del petrolio: Mitologia, storia e futuro della più controversa risorsa del mondo*, Milano: Feltrinelli, 2006.

[collab. tra] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio, ENEA, FINCO, *Libro bianco "energia-ambiente-edificio": dati, criticità e strategie per l'efficienza energetica del sistema edificio*, Milano: Il sole 24 ore, 2004.

Minke, Gernot, *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*, Boston: Wit Press, 2000.

Minke, Gernot, *Building with earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Basel: Birkhäuser, 2012.

Minke, Gernot, e Friedemann Mahlke, *Building with straw: design and technology of a sustainable architecture*, Basel: Birkhäuser, 2005.

Myhrman, Matts e S. O. MacDonald, *Build it with Bales: A Step-by-Step Guide to Straw-Bale Construction*, U.S.:Out on Bale, 1997.

Mitterer, Wittfrida e Gabriele Manella (a cura di), *Costruire sostenibilità: crisi ambientale e bioarchitettura*, Milano: FrancoAngeli, 2013.

Moroni, Mauro, e Fabrizio Onofri, *Piano casa, detrazioni fiscali e fotovoltaico*, Roma: EPC, 2009.

Nannei, Alessandra, *L'Italia oltre la crisi energetica*, Milano: Arnoldo Mondadori Editore, 1981.

OCSE, *Il mondo nel 2020 verso una nuova era globale*, Bologna: CLUEB, 1999.

Toninelli, Pier Angelo, *Lo sviluppo economico moderno dalla rivoluzione industriale alla crisi energetica*, Venezia: Marsilio, 1997.

Ondulit italiana, *Il contenimento energetico in edilizia: manuale di rapida consultazione*, Roma: DEI, 2011.

Petrini, Francesco, *Imperi del profitto: Multinazionali petrolifere e governi nel XX secolo*, Milano: Franco Angeli, 2015.

Ponzini, Carlo, *L'edificio energeticamente sostenibile: materiali contemporanei per il risparmio energetico*, Santarcangelo di Romagna (RN): Maggioli, 2012.

Preite, Massimo, *Edilizia in Italia dalla ricostruzione al piano decennale*, Firenze: Vallecchi, 1979.

Raimondo, Luca, Guglielmina Mutani e Chiara Massaia, *La procedura di certificazione della prestazione energetica : dal sopralluogo all'attestato*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli, 2014.

Richarz, Clements, Christina Schulz, Friedemann Zeitler, ed. italiana a cura di Enrico de Angelis, *Riqualificazione energetica*, Torino: UTET scienze tecniche, 2008.

Roche, Guido, *La termografia per l'edilizia e l'industria: manuale operativo per le verifiche termografiche*, Santarcangelo di Romagna (RN): Maggioli, 2012.

Rodonò, Umberto, *L'involucro esterno*, Catania : Dipartimento di architettura e urbanistica - Univ. degli studi di Catania, 1990.

Snell, Clarcke, e Tin Callahan, *Building green: a complete how-to guide to alternative building methods: earth plaster, straw bale, cordwood, cob, living roofs*, New York: Lark Books, 2005.

Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *Le case in paglia: come costruire edifici, uffici, capanne o cottage sostenibili, economici, efficienti e sicuri utilizzando le balle di paglia*, Bologna: Arianna editrice, 2013.

Swentzell, Athena, Bill Steen, David Brainbridge e David Eisenberg, *The straw bale house*, White River Junction: Chelsea Green Publishing, 1994.

Wienke, Uwe, *Manuale di bioedilizia*, Roma: Dei, 2008.

Zorzoli, Giovanni B., *Il dilemma energetico*, Milano: Feltrinelli, 1975.

Tesi

Badau, Ema Madalina, *Metodi e strumenti per la valutazione ambientale degli edifici: Confronto tra sistemi costruttivi convenzionali e naturali di un edificio residenziale*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2017.

Bertorello, Anna Rita, *Stra(w)isolami: analisi tecnologica di edifici esistenti isolati con balle di paglia*, Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, 2014.

Emmanueli, Lucia, *Costruire con la paglia: casi studio internazionali e l'esperienza italiana*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2010.

Giurauo, Luca, *Il tetto di paglia tra tradizione e innovazione*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2013.

Macrì, Maurizio, e Stefania Mancuso, *Costruzioni in balle di paglia: chiusure esterne alternative per edilizia a basso costo*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2004.

Mici, Ornela, *Tecnologie costruttive degli edifici in paglia*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2016.

Miotto, Cecilia, *Kay zewo: un prototipo abitativo in paglia portante per Haiti*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2014.

Pagliari, Maria Margherita, *Gli impieghi della paglia in edilizia: esperienze dirette in cantieri di autocostruzione*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2016.

Palazzo, Domenico, *Paglia: un'alternativa sostenibile per l'involucro*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2017.

Peretti, Andrea, *Costruire con la paglia: progetto e realizzazione in au-*

tocostruzione di un cappotto per edificio esistente, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, 2007.

Articoli on-line

Bucarelli, Massimo, *L'ENI e il petrolio dell'Iraq negli anni settanta: tra crisi energetiche e nazionalismo arabo*.

https://www.academia.edu/12000853/L_ENI_E_IL_PETROLIO_DELL_IRAQ_NEGLI_ANNI_SETTANTA_TRA_CRISI_ENERGETICHE_E_NAZIONALISMO_ARABO?email_work_card=view-paper

Gioffrè, Vincenzo, *Riciclare l'urbano. Strategie rigenerative per la "città Orizzontale"*, TECHNE Firenze University Press, 2019.

https://pico.polito.it/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_proquest2268536799&context=PC&vid=39pto_v&lang=it_IT&search_scope=everything&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=default_tab&query=any,contains,Strategie%20rigenerative%20per%20la%20%E2%80%9Ccitt%C3%A0%20Orizzontale&offset=0

Martino, Mauro, *Gli effetti della seconda crisi petrolifera (e non solo) in Italia*, 9 giugno 2014.

<https://ospeca.org/2014/06/09/gli-effetti-della-seconda-crisi-petroli-fera-e-non-solo-in-italia/>

Moraci, Francesca, e Celestina Fazia, *Ambiguità degli effetti delle discipline regionali sul consumo di suolo zero e sulla verticalità in architettura*, TECHNE, Firenze University Press, 2019.

https://pico.polito.it/primo-explore/fulldisplay?docid=TN_proquest2268535880&context=PC&vid=39pto_v&lang=it_IT&search_scope=everything&adaptor=primo_central_multiple_fe&tab=default_tab&query=any,contains,Ambiguit%C3%A0%20degli%20effetti%20delle%20discipline%20regionali%20sul%20consumo%20di%20suolo%20zero%20e%20sulla%20verticalit%C3%A0%20in%20architettura&offset=0

Radi, Valentina e Pietromaria Davoli, *A tutta paglia: soluzioni per una*

diversa visione del costruire e dell'abitare contemporaneo, L'ufficio tecnico, p 10:23. https://issuu.com/valentinamaini/docs/eff_energ_x_web_ut12.14

Sitografia

www.startingfinance.com (consultato il 17/10/19)

<http://www.anab.it> (consultato il 22/12/19)

<https://www.zerolab.biz> (consultato il 26/12/19)

www.deascuola.it (consultato il 26/12/19)

<https://journals.openedition.org> (consultato il 26/12/19)

www.qualenergia.it (consultato il 17/10/19)

www.panorama.it (consultato il 21/10/19)

www.getupandgoals.it (consultato il 09/12/19)

www.iea.org (consultato il 02/12/19)

www.isprambiente.gov.it (consultato il 05/12/19)

www.doppleronline.ca (consultato il 03/11/19)

www.houseplanninghelp.com (consultato il 02/12/19)

www.naturallifemagazine.com (consultato il 07/11/19)

www.pajaconstruction.com (consultato il 07/11/19)

www.treehugger.com (consultato il 03/11/19)

www.toit-vosgien.com (consultato il 02/12/19)

www.esbg2015.eu (consultato il 07/11/19)

www.strawworks.co.uk (consultato il 23/11/19)

www.thewoodlouse.blogspot.com (consultato il 24/11/19)

www.architonic.com (consultato il 24/11/19)

www.laboa.org (consultato il 08/11/19)

www.naturalmentepaglia.com (consultato il 23/11/19)

www.domenicopepe.eu (consultato il 23/11/19)

www.bosettiegatti.eu (ultima consultazione il 29/11/19)

Legislazione

Decreto 26 giugno 2009. *Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici.*

Decreto legislativo 30 maggio 2008, n. 115. *Attuazione della direttiva 2006/32/CE relativa all'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e abrogazione della direttiva 93/76/CEE.*

Decreto 26 giugno 2015. *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti*

minimi degli edifici.

Decreto del Presidente della Repubblica 28 giugno 1977, n. 1052. *Regolamento di esecuzione alla legge 30 aprile 1976, n. 373, relativa al consumo energetico per usi termici negli edifici.*

Decreto del Presidente della Repubblica 26 agosto 1993, n. 412. *Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attuazione dell'art. 4, comma 4, della legge 9 gennaio 1991, n. 10.*

Decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192. *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.*

Decreto legislativo 29 dicembre 2006, n. 311. *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia.*

Decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63. *Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale.*

Direttiva 2002/91/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2002, sul rendimento energetico in edilizia.

Direttiva 2006/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 5 aprile 2006, concernente l'efficienza degli usi finali dell'energia e i servizi energetici e recante abrogazione della direttiva 93/76/CEE del Consiglio.

Direttiva (UE) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 30 maggio 2018, che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla presta-

zione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.

Legge 30 aprile 1976, n. 373. *Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici.*

Legge 9 gennaio 1991, n. 10. *Norme per l'attuazione del piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di uso delle fonti rinnovabili di energia.*

Legge 3 agosto 2013, n. 90. *Conversione, con modificazioni, del decreto-legge 4 giugno 2013, n. 63 Disposizioni urgenti per il recepimento della Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia per la definizione delle procedure d'infrazione avviate dalla Commissione europea, nonché altre disposizioni in materia di coesione sociale.*

Norma EN ISO 6946:2018, *Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo.*

Norma ISO 9869:2015, *Isolamento termico - Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo del termoflussimetro.*

Norma ISO 8301:1991, *Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus.*

UNI EN ISO 7345:2018, *Prestazione termica degli edifici e dei componenti edilizi - Grandezze fisiche e definizioni.*