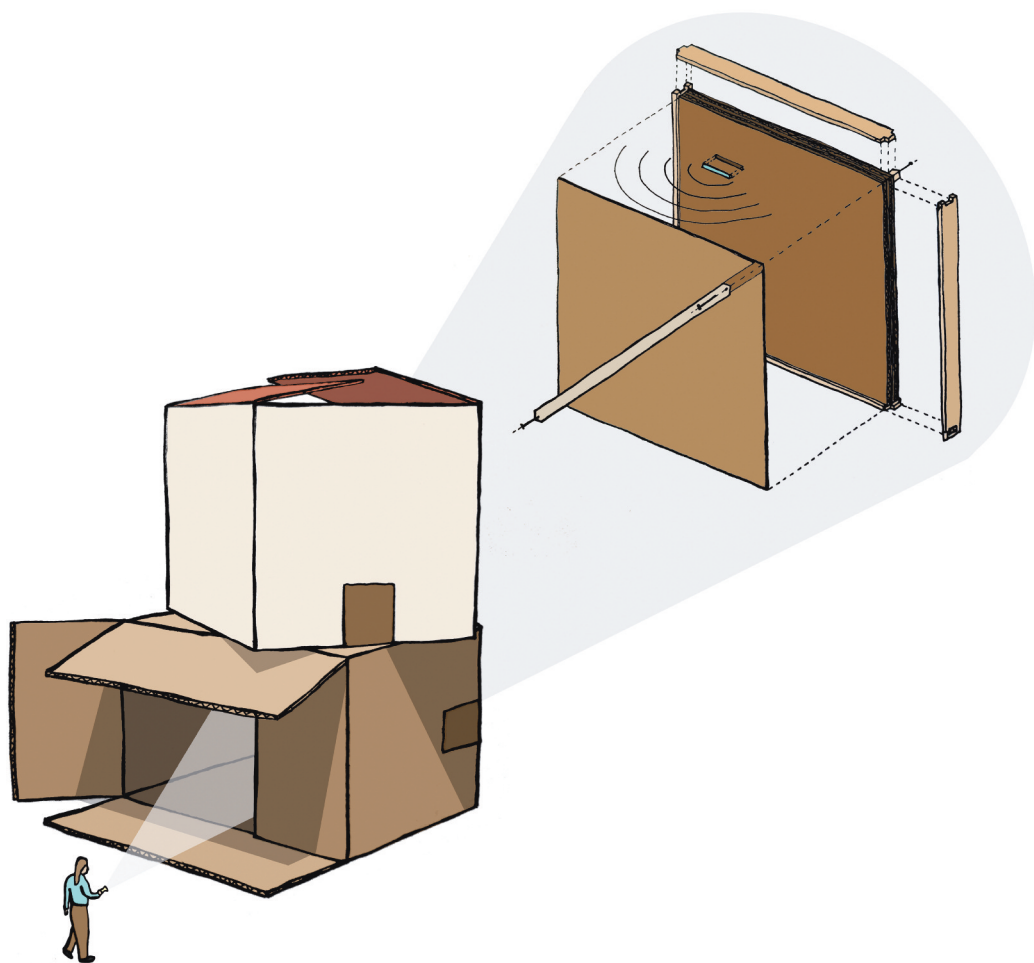


EDILIZIA

MARIANNA ROTILIO, CHIARA ANTONETTI

SISTEMI COSTRUTTIVI IN CARTONE

Caratteristiche e prestazioni



FRANCOANGELI

EDILIZIA/Studi

I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati possono consultare il nostro sito Internet: www.francoangeli.it e iscriversi nella home page al servizio “Informatemi” per ricevere via e.mail le segnalazioni delle novità.

MARIANNA ROTILIO, CHIARA ANTONETTI

**SISTEMI
COSTRUTTIVI
IN CARTONE**

Caratteristiche e prestazioni

FRANCOANGELI

Il presente volume è stato finanziato dall'Università degli Studi dell'Aquila nell'ambito del progetto di ricerca “La sostenibilità di sistemi costruttivi da impiegare in edilizia realizzati con materiali di riciclo”, Responsabile Scientifico Marianna Rotilio (Bando Progetti di Ateneo 2024, D.R. 2913 del 15.01.2024).



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DELL'AQUILA



Dipartimento di
Ingegneria Civile,
Edile-Architettura
e Ambientale

DIPARTIMENTO
DI ECCELLENZA
— MUR —
2023-2027

*In copertina: La ricerca sull'impiego del cartone in
edilizia: sistemi costruttivi da materiale cartaceo riciclato.*

Isbn e-book: 9788835169628

Copyright © 2025 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

L'opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d'autore.
Sono riservati i diritti per Text and Data Mining (TDM), AI training e tutte le tecnologie simili.
L'Utente nel momento in cui effettua il download dell'opera accetta tutte le condizioni della licenza
d'uso dell'opera previste e comunicate sul sito www.francoangeli.it

Alle nostre famiglie

Indice

Prefazione , di <i>Edoardo Alesse</i>	pag.	11
Introduzione	»	13
1. L'impatto ambientale dell'edilizia	»	14
2. L'emergenza abitativa	»	15
3. Le nuove caratteristiche dell'abitare	»	17
4. Gli obiettivi della ricerca	»	19
I PARTE		
1. Il cartone	»	23
1. Caratteristiche del materiale	»	23
2. Prodotti e impieghi comuni	»	26
2.1. Il cartone teso	»	27
2.2. Il cartone ondulato	»	28
2.2.1 Approfondimento tecnico	»	29
2.3. Il cartone alveolare	»	32
2.4. I tubi di cartone	»	33
3. Produzione e riciclo	»	35
2. L'impiego del cartone in edilizia	»	37
1. Proprietà meccaniche	»	38
2. Proprietà termiche	»	43
3. Proprietà acustiche	»	47
4. Altre proprietà	»	50
5. Conclusioni	»	50

3. Architettura della carta e del cartone	pag. 52
1. Dai primi impieghi ad oggi	» 52
2. Prospettive future	» 60
4. Casi di studio	» 62
1. Edifici realizzati	» 62
2. Sistemi commercializzati	» 64
3. Prototipi	» 69

II PARTE

1. La definizione del prodotto	» 75
1. Metodologia	» 75
2. Obiettivo	» 77
3. La caratterizzazione del materiale	» 79
2. Prove acustiche	» 82
<i>di Chiara Antonetti, Luis Palmero Iglesias, Jaime Llinares Millán, Marianna Rotilio</i>	
1. Materiali e metodi	» 82
1.1. Campioni	» 83
1.2. Strumenti	» 83
1.3. Condizioni ambientali	» 84
1.4. Normativa	» 85
1.5. Metodologia	» 86
1.5.1. Prima metodologia	» 86
1.5.2. Seconda metodologia	» 87
2. Prove e risultati	» 89
2.1. Prima metodologia	» 89
2.2. Seconda metodologia	» 89
3. Discussione dei risultati	» 93
4. Conclusioni	» 94
3. Prove meccaniche	» 95
<i>di Chiara Antonetti e Luis Palmero Iglesias</i>	
1. Materiali e metodi	» 95
1.1. Campioni	» 95
1.2. Strumenti	» 97
1.3. Condizioni ambientali	» 97
2. Prove e risultati	» 98

2.1. Prove di compressione	pag.	98
2.1.1. Caso di carico A	»	98
2.1.2. Caso di carico B	»	100
2.1.3. Discussione dei risultati	»	103
2.2. Prove di flessione	»	104
2.2.1. Caso di carico C	»	105
2.2.2. Caso di carico D	»	108
2.2.3. Discussione dei risultati	»	111
3. Conclusioni	»	111
4. Definizione del prototipo	»	113
1. Principi generali	»	113
2. Il pannello	»	114
5. Il contesto socio-culturale	»	118
1. L'indagine	»	118
2. Risultati	»	121
3. Conclusioni	»	125
Bibliografia	»	127
Sitografia	»	131
Crediti delle immagini	»	133
Ringraziamenti	»	135

Prefazione

di Edoardo Alesse¹

Questo volume si colloca nell'ambito delle azioni relative ai "Progetti di Ricerca di Ateneo", dell'Università degli Studi dell'Aquila che intende promuovere il sostegno a progetti di giovani ricercatori e il coinvolgimento di docenti dell'Ateneo nella realizzazione di ricerche innovative e interdisciplinari. Si tratta di una azione sistemica che ha l'obiettivo di stimolare la partecipazione a bandi nazionali ed internazionali, nel quadro della policy nazionale (Programma Nazionale per la Ricerca – PNR 2021-2027) e internazionale della ricerca (Horizon Europe 2021-27), in linea con le priorità trasversali delle pari opportunità e della parità di genere. L'iniziativa proposta dall'Ateneo è perfettamente in linea con l'art. 2 comma 2 dello Statuto che testualmente recita: "L'Università degli Studi dell'Aquila garantisce e promuove la libera attività di ricerca dei docenti, la pubblicità dei risultati scientifici e il libero confronto delle idee. Garantisce la libertà di insegnamento dei docenti ed il diritto degli studenti ad un'elevata qualità dell'istruzione e ad una formazione adeguata all'inserimento sociale e professionale degli stessi. A tale scopo promuove ogni azione atta a perseguire la qualità della ricerca e della didattica favorendo la cooperazione nazionale e internazionale".

Proprio in questa direzione va la ricerca illustrata nel volume che ha delineato un quadro conoscitivo generale volto ad offrire al lettore una visione d'insieme che risulti la più completa e dettagliata possibile, anche da un punto di vista internazionale, sulle proprietà e le opportunità d'uso del cartone in edilizia. A valle di un excursus che ripercorre la storia dell'impiego dei materiali cartacei in architettura, vengono illustrati alcuni casi applicativi degni di nota prodotti in Europa negli ultimi 20 anni. Delineato tale scenario di riferimento, nella seconda parte del libro viene presentata una

¹ Rettore dell'Università degli Studi dell'Aquila.

raccolta di esperienze di ricerca sperimentale sviluppate negli ultimi anni all'interno dell'Università degli Studi dell'Aquila in collaborazione con partner nazionali ed internazionali. Il lavoro risulta pertanto perfettamente in linea con gli obiettivi di Ateneo sopra delineati poiché promuove l'attività dei giovani ricercatori, la visibilità internazionale delle attività di ricerca, incrementando la partecipazione a reti di collaborazione, nonché la nascita di nuove idee innovative.

Quindi l'impegno annuale dell'Ateneo nell'emissione di bandi competitivi aiuta a realizzare lo sviluppo di un flusso continuo e strutturato di evoluzione del sapere, da un lato implementando lo stato dell'arte consolidato e dall'altro lasciando aperte strade innovative per un futuro sostenibile.

Quindi un ringraziamento affettuoso e congratulazioni agli Autori di questo molto interessante e certamente utile prodotto dell'intelletto.

Introduzione

L'architettura nasce in risposta al bisogno primario dell'uomo di offrire al proprio corpo ambienti di vita sicuri e confortevoli. Nel corso dei millenni il prodotto dell'architettura è passato dall'essere un oggetto elementare – nel significato, nella funzione, nei materiali e nei sistemi tecnologici – al diventare un'entità sempre più complessa e articolata, chiamata a soddisfare di volta in volta le numerose e sempre nuove esigenze derivanti dalla messa a sistema dei bisogni degli utenti con le caratteristiche del luogo geografico di appartenenza e le peculiarità del momento storico di riferimento. Arrivando all'epoca contemporanea, il fitto intreccio di problemi ambientali, sociali ed economici nel quale ci muoviamo rende necessaria, se non inevitabile, la messa in discussione, tra le varie altre cose, delle nostre tradizionali forme del costruire e dell'abitare. A differenza di quanto avveniva nel passato, disponiamo oggi di una consapevolezza sempre più profonda e dettagliata circa gli impatti che il settore edile ha su ambiente, società ed economia, rendendo impossibile continuare ad agire come se di tali informazioni non avessimo contezza. Il principale compito dei progettisti dell'oggi e del domani, dunque, consiste nello sperimentare con rinnovato spirito critico nuovi modi di concepire e realizzare l'architettura, attraverso l'elaborazione di soluzioni originali ed innovative sia nella forma che nella sostanza, vale a dire tanto nel modo di gestire lo spazio quanto nella definizione degli elementi costruttivi nonché nei materiali di cui essi sono costituiti. Affinché la progettazione contemporanea sia di qualità, essa non può evidentemente più prescindere dal fare proprio un sistema valoriale che guardi ben oltre la “semplice” buona riuscita dell'operazione di confinamento ragionato di uno spazio, dovendo invece necessariamente inglobare quale parte integrante dell'intero processo il tema della sostenibilità, nella triplice accezione del termine.

1. L'impatto ambientale dell'edilizia

Una delle questioni da prendere in considerazione riguarda gli impatti che il settore Building and Construction ha sull'ambiente, in tutte le sue fasi: dall'estrazione delle materie prime ai processi di lavorazione dei materiali edili, dalla fabbricazione degli elementi componenti alla costruzione degli edifici, dal periodo di utilizzo di questi ultimi fino alla loro dismissione, includendo le fasi di trasporto merci e rifiuti che intercorrono tra uno step e l'altro. Secondo il Global Status Report for Buildings and Construction redatto annualmente dall'UNEP, il Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente, nel 2022 il comparto dell'edilizia è stato responsabile del 30% della domanda energetica su scala mondiale – valore che sale al 34% se si considera anche l'energia impiegata per la produzione di materiali da costruzione – e del 37% delle emissioni di CO₂ totali legate ad energia e processi (UNEP, 2024). Come noto, il riscaldamento globale è causato dall'effetto serra dovuto alla presenza di gas nell'atmosfera terrestre, il più influente dei quali risulta essere, ad oggi, proprio l'anidride carbonica prodotta dalle attività umane (CE, 2024).

Avendo come obiettivo la mitigazione del cambiamento climatico in corso, dunque, risulta di fondamentale importanza che il settore delle costruzioni si renda protagonista di un cambio di approccio, tanto dal punto di vista teorico quanto sotto l'aspetto pratico, come del resto suggeriscono anche le principali organizzazioni nazionali ed internazionali che si occupano di fornire linee guida a riguardo. L'Agenzia Europea per l'Ambiente, ad esempio, sostiene che ottimizzare l'uso ed il riciclo dei materiali nella costruzione di nuovi edifici possa offrire «nuove e significative opportunità per ridurre le emissioni di gas serra» (AEA, 2022). Dal canto suo, anche l'ONU coinvolge direttamente il mondo dell'edilizia e dell'urbanistica negli obiettivi dell'Agenda 2030 (ONU, 2015), mirando a «rendere le città e gli insediamenti umani sostenibili» (SDG11) nonché «garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo» (SDG12), traguardo al quale è evidentemente riconducibile il tema dei materiali edili. Con un orizzonte temporale più a lungo termine, infine, l'European Green Deal – che mira a rendere l'Europa un continente a impatto climatico zero entro il 2050 – sostiene che «edifici ristrutturati ed efficienti sotto il profilo energetico» nonché «prodotti più duraturi che possano essere riparati, riciclati e riutilizzati» possano significativamente aumentare il benessere sociale, migliorando la salute delle generazioni attuali e di quelle future (CE, 2019).

Al giorno d'oggi è inverosimile credere che l'uomo occidentale sia disposto a rinunciare agli standard di comfort abitativo cui è abituato, né si

può pensare di porre impedimenti in tal senso ai paesi in via di sviluppo. Dunque, appare di fondamentale importanza elaborare nuove soluzioni che permettano di ottenere elevati livelli di qualità edilizia a fronte di costi ambientali decisamente più sostenibili per il pianeta. Le misure concretamente adottate finora non risultano sufficienti per poter garantire il conseguimento degli obiettivi auspicati – come dimostrano chiaramente i dati raccolti dal Buildings Performance Institute Europe (Fig. 1) – ragion per cui è necessario ampliare e migliorare le soluzioni attualmente disponibili e, allo stesso tempo, svilupparne di nuove, continuando ad avanzare lungo il percorso già intrapreso. In questo senso, un ruolo fondamentale è rivestito dal mondo della ricerca, impegnato nell’elaborazione di sistemi edilizi che siano innovativi, performanti e poco impattanti, da poter rendere di uso comune dopo un consistente lavoro di sperimentazione.

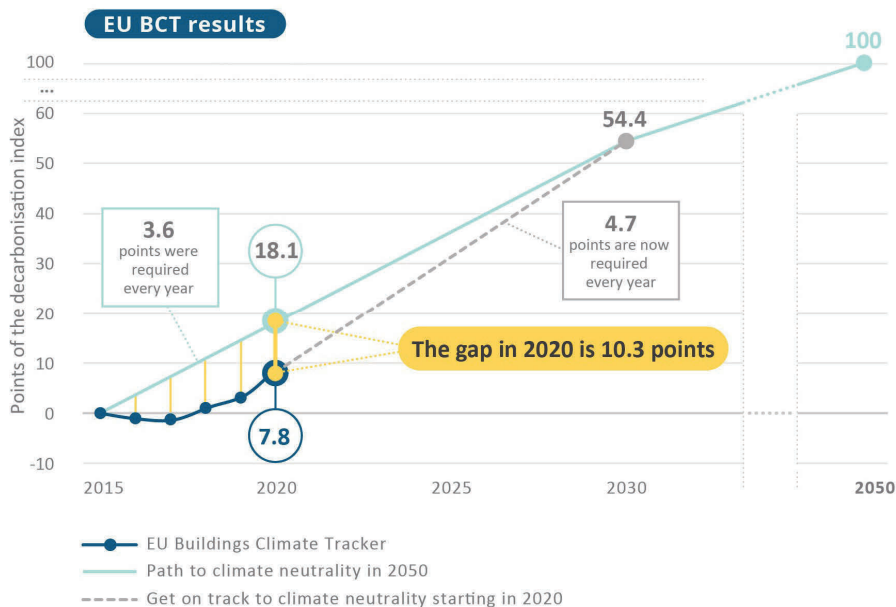


Fig. 1 - Buildings Climate Tracker calcolato dal Buildings Performance Institute Europe per l’Unione Europea in riferimento al periodo 2015-2020: confronto tra i valori rilevati e i valori necessari per essere in linea con l’obiettivo auspicato per il 2030.

2. L’emergenza abitativa

Un bisogno sempre più diffuso e trasversalmente comune a diverse ca-

tegorie di persone è attualmente costituito da soluzioni abitative di qualità, sicure e confortevoli ma al tempo stesso ottenibili a basso costo e in tempi brevi, spesso destinate ad un uso temporaneo. Un'esigenza di questo tipo si può palesare a seguito di eventi distruttivi, tanto di origine naturale quanto prodotti da attività antropiche, che danneggiano il patrimonio edilizio esistente rendendolo inagibile: non solo terremoti o guerre, ma anche frane, trombe d'aria, alluvioni, esondazioni o mareggiate. Come diretta conseguenza del cambiamento climatico in corso, infatti, fenomeni meteorologici estremi con conseguenze disastrose per l'ambiente costruito risultano essere in costante aumento per intensità e frequenza (Legambiente, 2023).

A questi eventi "eccezionali" si aggiunge poi la difficoltà nel conseguire uno spazio di vita dignitoso per tutti coloro che si muovono su scala nazionale ed internazionale nell'ambito dei grandi flussi migratori attivi oggi nel mondo. Secondo i dati dell'Agenzia delle Nazioni Unite per i rifugiati, alla fine del 2022 si contavano nel mondo 62,5 milioni di sfollati interni, mentre a metà del 2023 36,4 milioni di profughi, con 6,1 milioni di richiedenti asilo e 5,3 milioni di persone bisognose di protezione internazionale (UNHCR, 2024). Alla base degli spostamenti le ragioni più disparate e disperate: conflitti bellici, fame, povertà, persecuzioni etniche, politiche o religiose, negazione dei diritti umani, condizioni climatiche sempre più ostili alla vita umana. In tutti questi casi, difficilmente chi migra ha possibilità di accesso alle soluzioni abitative disponibili nel mercato del territorio di arrivo. Dunque, sistemi di edilizia leggera e a basso costo potrebbero rappresentare in tal senso una risorsa valida, impiegabile tanto nel privato quanto in termini di assistenza pubblica.

L'emergenza abitativa, tuttavia, non riguarda solo situazioni circoscritte al di fuori dell'ordinario. Il report prodotto nel 2022 dal Gruppo di Lavoro sulle Politiche per la Casa in Italia, infatti, rileva come sul territorio nazionale un numero sempre maggiore di nuclei familiari, non esclusivamente riconducibili a condizioni di disagio socio-economico severo, incontri serie difficoltà (ISTAT, 2022). A causa dell'aumento del costo della vita e dei numeri del mercato immobiliare odierno, nonché del mancato interesse da parte delle istituzioni verso lo sviluppo di politiche che affrontino in modo organico il tema della casa, sono sempre più numerose le persone che non riescono ad ottenere abitazioni adeguate alle proprie esigenze, pur vivendo in modo stabile e permanente in una certa area geografica. La scarsa disponibilità di sistemi costruttivi leggeri ed economici, in conclusione, risulta essere un problema oggettivo che, seppur in modi e misure variabili, riguarda una elevata percentuale di persone in Italia e nel mondo.

3. Le nuove caratteristiche dell'abitare

Un altro aspetto da tenere in considerazione riguarda le esigenze abitative dell'uomo contemporaneo, profondamente diverse rispetto a quelle che hanno caratterizzato la vita umana nei secoli scorsi. La società postmoderna, infatti, vive di un continuo muoversi e adattarsi, gli individui hanno esigenze complesse e mutevoli e sono chiamati ad affrontare condizioni a volte improvvise e spesso transitorie (Bauman, 2000). Ci si sposta di più, si cambia lavoro con maggior frequenza, è possibile gestire una parte sempre più consistente della propria vita per mezzo di un dispositivo provvisto di connessione internet. Tutto ciò comporta inevitabili ripercussioni anche sul modo di concepire lo spazio costruito, all'interno del quale l'uomo vive la maggior parte della sua vita. Accanto alla concezione prevalentemente statica degli edifici, tradizionalmente considerati fissi nella conformazione e durevoli nel tempo, si sta dunque facendo strada un approccio più dinamico, in cui l'architettura è caratterizzata da flessibilità e temporaneità (Calcagnini, 2018). La flessibilità può essere declinata sia in termini di variabilità nella configurazione degli spazi interni di un dato edificio, la cui organizzazione può cambiare per adeguarsi alle necessità mutevoli dell'utenza, sia sottoforma di adattabilità dei componenti edilizi stessi in relazione al contesto o alle circostanze specifiche (Kalhoefer e Radogna, 2022). Parallelamente, il concetto di temporaneità riferito all'edilizia prevede la possibilità di esistenza di un dato edificio o di parte di esso solo per il periodo di tempo in cui risulti essere strettamente necessario. Sistemi edilizi destinati ad un uso temporaneo sono ovviamente già presenti nel mondo dell'edilizia, con diverse funzioni e caratteristiche (Rotilio et al., 2022). È possibile in questo senso individuare due macrocategorie: da una parte si collocano quelle strutture realizzate per eventi occasionali quali esposizioni, competizioni sportive o festival, spesso di alto livello qualitativo ma il più delle volte costituenti casi unici difficilmente ripetibili; dall'altra parte, tutte quelle soluzioni abitative destinate ad usi più comuni, compreso quello residenziale, che tuttavia di solito non risultano associati ad un'elevata qualità del prodotto né ad una sua adeguata facilità di smaltimento (Fig. 2).

Un tema chiave in questo caso riguarda il rapporto tra temporaneità e durabilità. Le due parole non vanno confuse quali sinonimi, in quanto definiscono due concetti ben distinti la cui relazione dovrebbe essere sempre studiata quale parte integrante di ogni progetto. La temporaneità non dipende dal fatto che dopo un certo periodo di tempo l'oggetto architettonico in questione non sia più in grado di garantire le prestazioni richieste, quanto piuttosto dal fatto che di quel sistema, con la sua specifica funzione in un

determinato luogo, possa ad un certo punto non essercene più bisogno, ed è a questo punto che si inserisce il concetto di durabilità.

La possibilità di facile rimozione di un oggetto architettonico dall'area di sedime dello stesso permette di preservare l'integrità di quest'ultima, con gli evidenti vantaggi ambientali in termini di consumo del suolo che ciò comporta, tuttavia per poter parlare davvero di sostenibilità il processo va affrontato nella sua interezza, vale a dire prendendo in considerazione anche il fine vita degli elementi che compongono il sistema. La durabilità va dunque valutata caso per caso e gestita considerando tanto l'effettiva possibilità di reimpiego degli elementi componenti del sistema quanto la capacità dei materiali che li compongono di continuare ad offrire determinate prestazioni nel corso del tempo. Un approccio realmente sostenibile deve porsi domande sul fine vita già a partire dalla fase pre-progettuale di un organismo architettonico, operando dunque, durante tutto il processo di definizione dello stesso, scelte che siano orientate principalmente alla reversibilità ed al reimpiego. Una progettazione che preveda la temporaneità dell'opera può essere considerata ben riuscita quando riesce a ridurre al minimo la produzione di rifiuti in favore dell'attivazione di processi di riuso o riciclo, secondo i principi del *Design for Disassembly* (Guy e Ciarimboli, 2008).



Fig. 2 - Moduli Abitativi Provvisori realizzati a L'Aquila in seguito al terremoto del 2009.

Negli ultimi tempi i concetti di temporaneità e flessibilità in architettura hanno iniziato a suscitare un interesse sempre maggiore non solo in virtù dell'importanza crescente che viene attribuita oggi al tema della sostenibilità ma anche come risposta adattiva ai cambiamenti apportati al nostro stile di vita dalla recente pandemia. In ambito lavorativo, ad esempio, è emersa con grande chiarezza la possibilità per numerose attività professionali di essere

svolte anche a distanza rispetto alla sede fisica loro designata in origine, con la conseguente affermazione su ampia scala del lavoro da remoto, svincolato cioè dal luogo specifico, e di quello smart, libero anche dal punto di vista dell'orario e dell'organizzazione (Capoferro, 2022). Tutto ciò ha fatto sì che, laddove possibile in relazione al tipo di attività da svolgere, studi professionali, uffici e aziende iniziassero ad avere bisogno di meno spazio in sede o esprimessero l'esigenza di un'organizzazione spaziale differente. Nel caso del regime ibrido, cioè misto tra attività presenziale e lavoro da remoto – e secondo l'Osservatorio Smart Working del Politecnico di Milano questa tipologia rappresenta il principale trend per l'evoluzione dei futuri modelli di lavoro (Osservatorio Smart Working, 2022) – può risultare utile disporre di un assetto spaziale facilmente variabile, dunque flessibile e temporaneo, a seconda del numero e della categoria di lavoratori che devono essere ospitati in sede in un determinato periodo di tempo (Brouge, 2023).

4. Gli obiettivi della ricerca

Dalla messa a sistema delle condizioni appena descritte è possibile dedurre che lo sviluppo di nuovi sistemi edilizi innovativi e sostenibili rappresenta una valida risorsa per il soddisfacimento simultaneo di molteplici esigenze. Non a caso, negli ultimi decenni è notevolmente cresciuto l'interesse rivolto dal mondo della ricerca verso la definizione di nuove tecnologie costruttive a ridotto impatto ambientale, caratterizzate inoltre da economicità, adattabilità, flessibilità e reversibilità.

Alla base di ogni sistema edilizio, è evidente, vi sono i materiali edili, che rivestono un ruolo fondamentale tanto in termini di costi e impatti quanto di funzionamento e prestazioni. In molti casi, le sperimentazioni attualmente condotte hanno per obiettivo l'ottenimento di versioni migliorate di materiali già comunemente impiegati, come nel caso del cemento e del calcestruzzo (Bbosa e Odongo, 2024). Per quanto riguarda quest'ultimo, ad esempio, si investiga sull'aggiunta di sostanze di scarto di altre lavorazioni (come ceneri volanti o scorie di altoforno), sull'uso di aggregati riciclati, sull'additivazione con estratti vegetali quali inibitori della corrosione (Naderi et al., 2022), sull'introduzione di fibre naturali per il miglioramento delle prestazioni meccaniche del materiale (Hait et al., 2024). In altri casi, invece, la ricerca riguarda la definizione di nuovi materiali per l'edilizia, spesso sviluppati a partire da materie prime di origine vegetale come il bambù (Md Tahir et al., 2023), la canapa (Muhit et al., 2024) o i miceli (Peyrovisray et al., 2024).

Negli ultimi anni, la comunità scientifica nazionale ed internazionale ha

iniziato a mostrare un'attenzione sempre maggiore nei confronti delle possibili modalità di impiego del cartone nel mondo delle costruzioni, ritenendo che questo materiale, con le dovute accortezze, possa arrivare a contribuire efficacemente alla realizzazione di soluzioni costruttive che risultino ecocompatibili, performanti e poco costose, vale a dire sostenibili nella tripla declinazione del termine: ambientale, economica e sociale. Effettuando una ricerca nel Web of Science database è possibile notare come il numero di documenti scientifici che trattano l'argomento sia più che quintuplicato negli ultimi 20 anni, con la partecipazione all'attività investigativa di numerosi Paesi (Fig. 3).

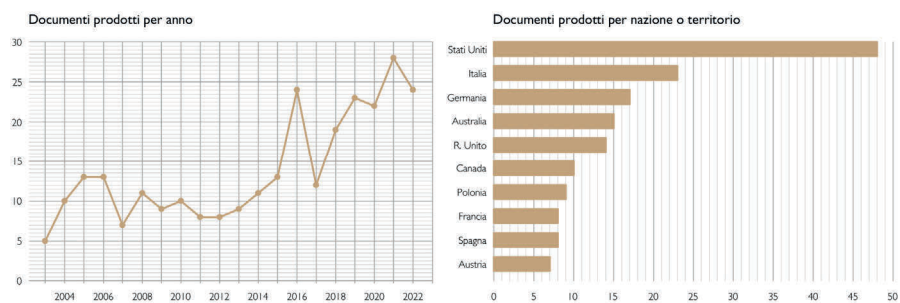


Fig. 3 - Risultati della ricerca con keywords "cardboard AND building" nel Web of Science database. Documenti prodotti per anno (a sinistra) e distribuzione dei prodotti suddivisi per nazione (a destra) tra il 2002 e il 2022.

È proprio in questo filone di ricerca che si va ad inserire il lavoro esposto nel presente volume, il cui obiettivo è quello di valutare l'impiegabilità di elementi in cartone ondulato nello sviluppo tecnologico di un sistema di pannelli per l'edilizia. A partire dalle soluzioni offerte dall'industria del cartone attualmente attiva, destinate ad usi del tutto differenti rispetto a quello edilizio, lo studio mira a valutare l'influenza di alcune caratteristiche del materiale sulle proprietà finali del componente architettonico che ne fa uso, in modo tale da poter arrivare gradualmente ad ottenere prodotti che siano ottimizzati per l'impiego edile. Nei prossimi capitoli sono illustrati i risultati prodotti da una ricerca che ha affrontato lo studio del cartone partendo dalla conoscenza generale del materiale e delle sue proprietà e successivamente analizzando gli usi che ne sono stati fatti finora in architettura, dalle prime applicazioni fino ai giorni nostri. In seguito, vengono riportati i risultati di una campagna di prove sperimentali condotta su due diverse tipologie stratigrafiche in cartone ondulato laminato, per le quali viene formulata inoltre un'ipotesi applicativa concreta.

I Parte

1. Il cartone

1. Caratteristiche del materiale

Alla base dei materiali cartacei vi è la cellulosa, il biopolimero più comune al mondo nonché principale componente strutturale del regno vegetale. Carta e cartone sono infatti prodotti a partire da fibre naturali, che possono avere diversa origine. La materia prima può essere legnosa (legno duro, legno tenero, residui vari della lavorazione del legname di vario tipo, ecc.) o non legnosa (colture non legnose, piante a crescita spontanea, prodotti residui dell'agricoltura, scarti del settore tessile, ecc.) oppure derivare dal processo di riciclo di altri materiali cartacei (Łątka et al., 2022). L'ottenimento delle fibre da materia prima vergine può avvenire tramite un processo di tipo meccanico, come nel caso dello sfibramento per abrasione di tronchi scortecciati con l'ausilio di acqua, oppure attraverso processi di tipo chimico, durante i quali a temperatura e pressione controllate vengono aggiunte alla materia vegetale sminuzzata acqua e sostanze chimiche che favoriscono la separazione delle fibre. Questo secondo procedimento permette di ottenere fibre meno danneggiate e impure, dunque più stabili e resistenti, capaci quindi di dare vita a prodotti di migliore qualità (Knaak et al., 2023). In entrambi i casi, la preparazione delle fibre costituisce una fase preliminare che avviene di solito in appositi stabilimenti. Successivamente, le fibre arrivano sottoforma di balle pressate ai siti di produzione di carta e cartone, dove per prima cosa viene loro aggiunta dell'acqua. L'impasto di acqua e fibre così ottenuto va incontro a diverse lavorazioni, che possono variare a seconda del risultato finale che si desidera ottenere. Nello specifico, possono essere effettuati nuovi processi di tipo meccanico, come nel caso della raffinazione (ulteriore sminuzzamento delle fibre), oppure possono essere aggiunte al composto varie altre sostanze (principalmente polveri

minerali e additivi chimici). Tali lavorazioni permettono di ottenere miglioramenti o variazioni nelle proprietà finali del prodotto, come, ad esempio, una maggiore resistenza alle sollecitazioni meccaniche, alle deformazioni o al fuoco, una differente colorazione, una maggiore o minore opacità, una migliore stampabilità, ... Le polveri minerali svolgono soprattutto una funzione di riempimento e rinforzo strutturale interno del materiale cartaceo e vengono sempre aggiunte al composto quando esso è in stato di polpa. Gli additivi, invece, possono essere aggiunti alle fibre in sospensione acquosa oppure, in alcuni casi, possono essere applicati in un secondo momento sulla superficie del prodotto finito (Knaak et al., 2023). Il processo di applicazione superficiale può essere integrato nella stessa linea produttiva del materiale cartaceo oppure essere eseguito successivamente, in separata sede. In aggiunta rispetto agli additivi usati per scopi strettamente funzionali, nell'impasto vengono introdotte anche altre sostanze chimiche necessarie per lo svolgimento ottimale delle lavorazioni ma prive di influenza diretta sulle caratteristiche del prodotto finale, all'interno del quale restano infatti presenti in quantità minima (Knaak et al., 2023). Come anticipato, la cellulosa può essere ottenuta anche da carta e cartone riciclati. In tal caso, il materiale cartaceo già usato è raccolto, stoccato, diviso per tipologie, imballato ed inviato alle cartiere, dove viene sottoposto a macinazione per mezzo di pale rotanti in grandi vasche con l'aggiunta di acqua calda. La polpa ottenuta in questo modo viene sottoposta a trattamenti specifici finalizzati ad eliminare eventuali sostanze contaminanti presenti al suo interno (plastiche, vetro, ferro, colle, ...) e, nel caso in cui si desideri un elevato grado di bianco, può subire anche un processo di disinchiostrazione. Per la creazione di un nuovo prodotto è possibile usare sia fibra proveniente da materiale vergine sia fibra derivante da materiale riciclato. I due tipi di polpa che ne derivano possono essere usati in modo esclusivo o miscelati tra loro, secondo un rapporto percentuale da definire in funzione di ciò che si vuole ottenere (Smook, 2016). Una volta ottenuto il composto desiderato, esso viene avviato al vero e proprio processo di produzione del prodotto cartaceo, attuato per mezzo di un macchinario automatizzato funzionante in regime continuo con una velocità di produzione che può raggiungere i 1500-2000 m di carta al minuto (Smook, 2016). Il macchinario distribuisce uniformemente l'impasto sulla tela di formazione, un nastro che consente la perdita dell'acqua. Successivamente, la polpa viene pressata mediante cilindri in feltro di lana che consentono un'ulteriore perdita di acqua ed il contestuale conseguimento di uno spessore uniforme. A questo punto il foglio continuo viene asciugato e seccato mediante il passaggio attraverso cilindri riscaldati a vapore. Il prodotto così ottenuto viene poi sottoposto ad un processo di calandratura

per l'eliminazione delle ultime imperfezioni, terminando il suo percorso arrotolato in grandi bobine. I fogli prodotti come descritto possono raggiungere i 10 m di larghezza e diversi chilometri di lunghezza (Łatka, 2017). Lo spessore viene invece stabilito a monte del processo produttivo. Le bobine madri vengono poi ridotte dimensionalmente oppure tagliate in fogli per essere vendute ad altre industrie. Tali prodotti possono essere utilizzati senza subire alcuna modifica o, in alternativa, essere sottoposti a ulteriori lavorazioni finalizzate all'ottenimento di prodotti più complessi, come avviene per alcune tipologie di cartone. La carta usata per i fogli ondulati, per esempio, viene dapprima ammorbidita con vapore acqueo ad alta pressione e poi passata tra cilindri ondulatori che le conferiscono il profilo desiderato.

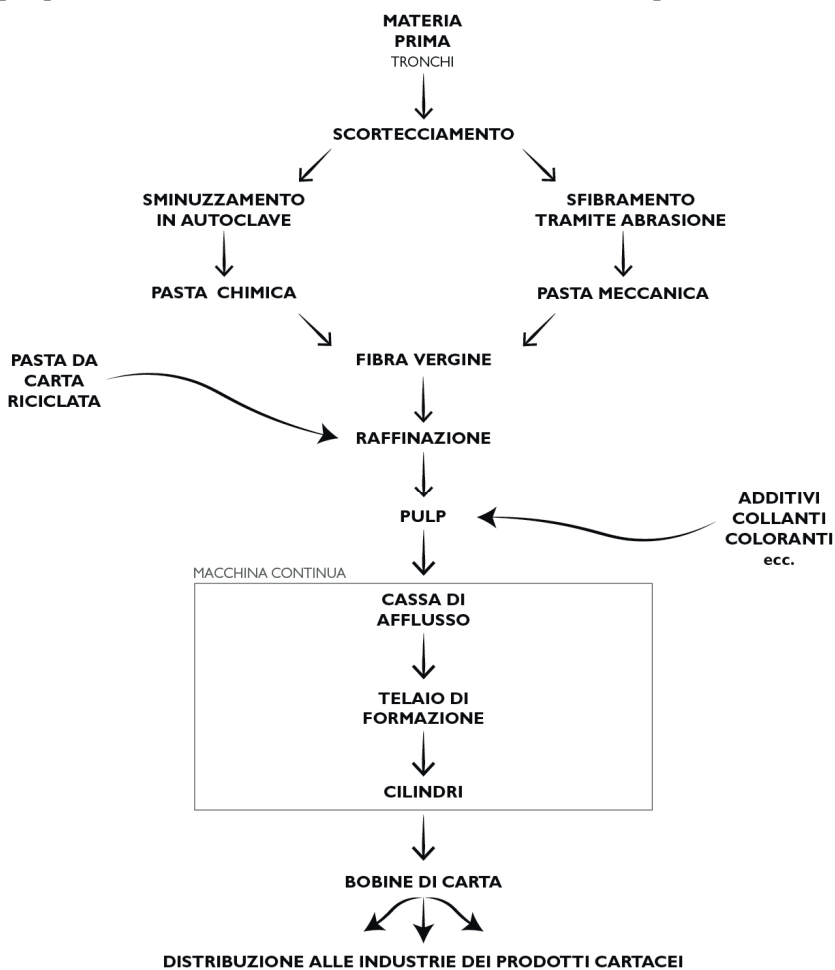


Fig. 1 - Schema del processo produttivo dei materiali cartacei.

I criteri in base ai quali operare una distinzione tra carta e cartone a livello terminologico non sono univocamente determinati. Se si concorda nel definire “cartone” prodotti cartacei maggiormente strutturati come il cartone ondulato e quello alveolare, non è altrettanto immediato attribuire una definizione univoca al materiale quando la sua struttura è costituita da un unico foglio. In termini di composizione chimica, infatti, le due tipologie sono equivalenti (Łątka et al., 2022), dunque la differenziazione, come indicato dalla norma ISO 4046:2016, «è basata sullo spessore o sulla grammatura anche se in alcuni casi si può basare sulle caratteristiche e/o sull’uso finale». A parità di spessore, ad esempio, i supporti per le belle arti sono sempre definiti come carte, mentre si parla di cartone nel caso del materiale usato per il packaging. Nella versione del 1978 della stessa norma vi era invece una distinzione oggettiva (poi rimossa) in base alla quale il cartone veniva individuato al di sopra dei 224 g/m² per elementi a singolo strato e al di sopra dei 160 g/m² nel caso di prodotti multilayer (Łątka, 2017).

2. Prodotti e impieghi comuni

Alla luce di quanto appena descritto, appare evidente che le caratteristiche di un prodotto in cartone dipendano da numerose variabili. Dal punto di vista della composizione del pulp di partenza, ad esempio, è possibile scegliere il rapporto percentuale tra fibre vergini e fibre da materiale riciclato, selezionare l’origine delle une e delle altre, aggiungere alla polpa sostanze additive di quantità e qualità variabili al fine di conferire al materiale risultante le proprietà funzionali o estetiche desiderate. Per quanto riguarda le caratteristiche fisiche, invece, è possibile progettare lo spessore e la geometria di ciascuno strato, la modalità di combinazione tra strati differenti, la sagoma dell’oggetto finale. Infine, sul prodotto possono essere effettuati trattamenti a posteriori. Attualmente il cartone è presente sul mercato declinato in numerose varianti, comunemente impiegate per la realizzazione di un’ampia gamma di prodotti. Volendo operare una distinzione tipologica, generalizzando per macrocategorie, è possibile riscontrare l’esistenza di quattro tipologie principali: il cartone teso, il cartone ondulato, il cartone alveolare e i tubi di cartone (Łątka, 2017; Câmpean, 2020; Łątka et al., 2022). Da un’analisi effettuata sullo stato dell’arte si può concludere che, fino ad oggi, la quasi totalità delle sperimentazioni riguardanti i possibili impieghi innovativi del materiale in edilizia è stata sviluppata a partire dalle tipologie già esistenti in commercio, a volte leggermente modificate per essere rese più idonee e performanti in relazione agli usi previsti.

2.1. Il cartone teso

Il cartone teso è caratterizzato da uno spessore che va dai 0,25 ai 4,00 mm e da una grammatura elevata, che può arrivare anche ai 3500 g/m² circa. Si tratta di una tipologia che comprende una vasta gamma di prodotti, con caratteristiche e funzioni anche molto diverse tra loro (Fig. 2). Il cartone teso può presentarsi come un materiale omogeneo semplice o come risultato di vari strati laminati; nella configurazione più elementare gli strati sono tre: una copertina, uno strato centrale (quasi sempre di materiale riciclato) e un retro. Al fine di conferire al prodotto particolari caratteristiche estetiche e/o prestazionali, è possibile applicare sulle facce esterne delle lamine di finitura superficiale (Knaak et al., 2023; COMIECO, 2011). Tramite l'applicazione di film plastici, ad esempio, è possibile rendere le copertine impermeabili, ottenendo un cartone adatto a contenere liquidi. I cartoni possono essere grigi o bianchi o colorati tramite sostanze introdotte in polpa oppure per stampa sul prodotto finito. Il cartone teso viene impiegato principalmente per la fabbricazione di scatole e contenitori destinati ad accogliere beni di ogni tipo, dagli alimenti ai cosmetici passando per dispositivi elettronici, complementi d'arredo o oggettistica di qualsiasi tipo. Nel campo degli imballaggi questa tipologia viene impiegata anche sottoforma di profili di protezione e rinforzo (ad L, ad U, ...). Un altro importante uso è quello che riguarda la cartotecnica, ma sono molto comuni anche diversi altri campi di impiego, come il settore calzaturiero in cui viene usato per la realizzazione di solette e sottopiedi (COMIECO, 2011).



Fig. 2 - Oggetti di uso comune in cartone teso, con diverse finiture e caratteristiche.

2.2. Il cartone ondulato

Il cartone ondulato è dato dalla stratificazione alternata di fogli di carta piani e fogli ondulati, tenuti insieme da sostanze collanti. In virtù di questa struttura il materiale risultante è leggero e resistente e può essere declinato in numerose configurazioni differenti. In quella di base, esso presenta due superfici esterne piane, dette copertine, ed un foglio ondulato centrale. Gli strati ondulati centrali possono essere anche più di uno, presentandosi in tal caso separati da ulteriori fogli lisci detti fogli tesi. Oltre che nel numero, i fogli ondulati possono variare anche in relazione all'altezza dell'onda, la cui ampiezza può andare da 0,80 a 5,00 mm. Tutti i fogli, tanto quelli tesi quanto quelli ondulati, sono poi contraddistinti da una grammatura specifica, che generalmente varia dai 100 ai 200 g/m² circa per le onde e dai 120 ai 350 g/m² circa per le copertine. Un ulteriore fattore di variabilità riguarda la composizione della polpa di partenza (Knaak et al., 2023; COMIECO, 2011). Ciascuna di queste variabili influenza le proprietà del prodotto finale, la cui stratigrafia potrà dunque essere progettata ad hoc in funzione dello scopo desiderato (Ayan, 2009). Il mondo dell'imballaggio e del packaging costituisce il principale campo di impiego di questa tipologia, che tuttavia viene comunemente impiegata anche per realizzare espositori di merce, arredi provvisori, cartelloni pubblicitari o informativi da interni e simili. A rendere il cartone particolarmente adatto a questo tipo di usi, al di là della sua economicità e della leggerezza, è la possibilità di stampa diretta su di esso (COMIECO, 2011).



Fig. 3 - Arredi modulari e cartellonistica in cartone ondulato in ambiente fieristico (a sinistra); prototipi per arredi e giochi per bambini in cartone ondulato e alveolare (a destra).

2.2.1. Approfondimento tecnico

Nella sua configurazione elementare il cartone ondulato è composto da due fogli di carta piani, detti copertine, e uno o più fogli di carta ondulata, detti onde, tenuti insieme da collanti naturali derivati ad esempio da amidi di mais o fecola. I fogli ondulati possono anche essere due o più e, in tal caso, fra l'uno e l'altro viene collocato un altro foglio piano, detto foglio teso centrale. Ciascuno di questi elementi può differire per composizione chimica, spessore e grammatura. Il sistema convenzionale di nomenclatura del cartone ondulato comunemente fabbricato e commercializzato prevede una sigla alfanumerica che identifica ciascun prodotto descrivendone le caratteristiche, consistenti in: numero e ordine dei fogli, tipologia di carta, grammatura e tipo di onda di ciascuno di essi.

Ad esempio, un cartone la cui sigla identificativa è KSKSK/54545/BC sarà costituito da:

- copertina esterna carta Kraft, classe 5;
- prima onda carta Semichimica onda B, classe 4;
- foglio teso centrale carta Kraft, classe 5;
- seconda onda carta Semichimica onda C, classe 4;
- copertina interna carta Kraft, classe 5.

Dal punto di vista della composizione, le tipologie di carta impiegate per la realizzazione dei fogli di copertina sono le seguenti:

- K, Kraft: carta con elevate caratteristiche meccaniche prodotta con pasta chimica di conifera al solfato; si ammette la presenza di pasta chimica di latifoglia e/o di pasta di semichimica nella misura non superiore al 20%;
- L, Liner: carta con buone caratteristiche meccaniche prodotta in uno o più strati con materie fibrose;
- T, Test: carta con discrete caratteristiche meccaniche, prodotta come la Liner in uno o più strati con materie fibrose;
- KB / LB / TB: come le precedenti, ma in colorazione bianca;
- C, Camoscio: carta prodotta esclusivamente con pasta di recupero dotata di scarsa resistenza;
- BP: cartone patinato.

Per quanto riguarda le onde, le tipologie di carta impiegate sono invece le seguenti:

- SS, Semichimica Scandinava: carta con elevate caratteristiche meccaniche prodotta con pasta semichimica scandinava di latifoglia nella misura minima del 65%;
- S, Semichimica: carta con ottime caratteristiche meccaniche prodotta con pasta semichimica di latifoglia nella misura minima del 65%;

- US, Uso Semichimica: carta trattata, prodotta con pasta di carta da recupero e/o paste meccaniche o semichimiche, buone caratteristiche meccaniche;
- M, Medium: carta trattata e non trattata prodotta con pasta di carta da recupero e/o paste meccaniche o semichimiche, buone caratteristiche meccaniche;
- F, Fluting: carta con ridotte caratteristiche meccaniche prodotta esclusivamente con pasta di recupero.

Dal punto di vista dimensionale esistono cinque categorie di fogli ondulati, associati a diverse altezze di onda come riportato in Tab. 1. Le singole onde possono poi essere accoppiate per creare delle stratigrafie a doppia o tripla onda (Fig. 4).

Tab. 1 - Principali tipi di onde del cartone ondulato.

<i>Nome</i>	<i>Tipologia</i>	<i>Altezza minima di onda [mm]</i>
F	Microonda	0,70
E	Microonda	1,20
B	Onda Bassa	2,50
C	Onda Media	3,50
A	Onda Alta	4,50

Le grammature più comuni sono riportate in Tab. 2.

Tab. 2 - Grammatura dei fogli usati per la produzione di cartone ondulato.

<i>Copertine</i>		<i>Fogli ondulati</i>	
<i>Nomenclatura</i>	<i>Grammatura [g/mq]</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Grammatura [g/mq]</i>
classe 2	125	<i>Semichimiche e Medium</i>	
classe 3	150	classe 2	112
classe 4	175	classe 4	127
classe 5	200	classe 6	150
classe 6	225	classe 9	180
classe 8	275	<i>Fluting</i>	
classe 9	300	classe 2	120
classe 02	337	classe 4	145
classe 04	400	classe 6	170
classe 06	440	classe 9	210