



COSTRUIRE CON LA PLASTICA UNA NUOVA POSSIBILE SOLUZIONE PER L'AMBIENTE

BUILDING WITH PLASTIC A NEW POSSIBLE SOLUTION FOR THE ENVIRONMENT

Daniela Besana^a, Claudia Ferrari^b

ABSTRACT

La ricerca affronta il tema di un possibile riciclo delle bottiglie di plastica in edilizia come circuito aggiuntivo di riuso. A seguito di una preliminare analisi critica di casi di studio per evidenziare le possibili variabili progettuali, si propone un metodo innovativo che usi la bottiglia di plastica per la realizzazione di murature a funzione portante. Sono stati progettati e realizzati modelli con diverse soluzioni costruttive fino alla proposta di un modulo composto da quattro bottiglie riempite di sabbia e legate tra loro. Le prove di compressione in laboratorio hanno permesso di dimostrare la solidità del modulo di base e analisi f.e.m. di comprovare la stabilità della struttura. Questi primi risultati incoraggiano verso l'approfondimento di altre analisi e testimoniano una sua potenziale versatilità costruttiva ed esportabilità d'uso anche in contesti differenti sia a livello sociale, economico e ambientale.

The research concerns a possible way for recycling plastic bottles as construction material, as an additional reuse circuit. Following a preliminary critical analysis of case studies to highlight the possible design variables, an innovative method which uses plastic bottles for the construction of load-bearing walls is proposed. Models of different constructive solutions have been designed and built, up to the proposal of a module of four bottles, filled with sand and tied together. Laboratory compression tests have shown the strength of the basic module and a f.e.m. analysis has demonstrated the stability of the structure. These first results encourage to other more accurate analysis and testify its potential versatility as building material and exportability of use even in different contexts, at a social, economic and environmental level.

KEYWORDS

plastica, riciclo, bottiglie in PET, economia circolare, gestione dei rifiuti

plastic, recycle, PET bottles, circular economy, waste management

L'Italia, con 208 litri di acqua minerale a persona, è il primo Paese europeo e secondo nel mondo per consumo di acqua in bottiglia con un aumento mondiale della produzione pari a circa 5 volte dal 1980 ad oggi con conseguenze allarmanti sulla quantità di scarti. La produzione mondiale di plastica è in costante aumento passando dai 15 milioni del 1964 ai circa 340 milioni attuali (World Economic Forum et alii, 2018) rispetto ai quali l'Asia ne produce circa il 50% e, la sola Cina, circa il 29% (Plastics Europe, 2018). L'Europa è il secondo produttore di plastica, attestata a 60 milioni di tonnellate, pari a circa il 20% di quella mondiale. Dagli anni Cinquanta del secolo scorso, con l'avvio della grande diffusione dell'utilizzo della plastica, si sono prodotti 8,3 miliardi di tonnellate di plastica, buttandone in natura circa 6,3 miliardi. Anche se solo l'andamento della produzione rimanesse immutato, si stima che la quantità di rifiuti di plastica potrebbe raggiungere i 34 miliardi di tonnellate nel 2050 di cui almeno 12 tonnellate costituirebbero rifiuti sparsi.

Ad oggi solo il 9% di plastica viene riciclato, il 12% incenerito mentre il 79% finisce nelle discariche e in tutti gli ambienti naturali (Geyer, Jambeck and Law, 2017). Dal 1990 ad oggi i consumi sono stabilmente cresciuti (+5% all'anno) e la domanda dei consumatori europei aumenta parallelamente alla produzione. A fronte di questa crescita esponenziale di anno in anno, Gaele Gourmelon (2015) del Worldwatch Institute spiega come il recupero e il riciclaggio restino insufficienti, dal momento che la maggior parte della plastica finisce nelle discariche e soprattutto negli oceani. Si stima infatti che, ogni anno, entrino negli oceani dalle 1,15 alle 2,41 milioni di tonnellate di plastica (Lebreton, 2018), prevalentemente polietilene (PE) o polipropilene (PP) (Chen, 2017) e che esistano cinque isole di plastica che galleggiano negli oceani, la più grande di queste, nel Pacifico di circa 80.000 tonnellate.

Il consumo di plastica in Europa è in media di 31 chili annui pro-capite; l'Italia è il settimo Paese europeo in termini di generazione di rifiuti in plastica pro-capite, con circa 35 chili all'anno, di cui gran parte usato per il confezionamento. È proprio a questo settore che spetta il primato per il maggiore utilizzo di plastica, immediatamente seguito da quello edilizio. Questa emergenza ambientale mette in luce una forte responsabilità della società che deve necessariamente far fronte alla sempre cre-

scente necessità di smaltire in modo appropriato la plastica. Se si considera il solo settore edilizio, l'uso della plastica è ampiamente diffuso non solo relativamente alla produzione di materiali edili (isolamento, tubature, telai, etc.) ma anche nell'intero processo edilizio: stoccaggio e confezionamento del materiale e trasporto.

I progettisti, non solo come cittadini ma anche come principali attori delle politiche edilizie, hanno dunque una grossa responsabilità per trovare nuove strategie atte a limitare l'uso della plastica e, contestualmente, a ipotizzare nuove forme di riutilizzo. Da queste premesse ha preso avvio la ricerca, con l'obiettivo di riutilizzare la plastica per scopi edilizi. Metodologicamente la prima fase della ricerca si è indirizzata all'inquadramento e alla conoscenza del tema, in particolare attraverso lo studio del suo processo storico ed evolutivo, per poi soffermarsi sulle differenti tipologie. Ci si è dunque interrogati su quale fosse il tipo di plastica più adatto e più facilmente reperibile per poterlo riutilizzare. La scelta si è infine focalizzata sulle bottiglie da 500 ml, frequentemente e diffusamente utilizzate, e il cui ciclo di vita è molto spesso brevissimo: la bottiglia viene consumata e gettata integra nella sua forma originaria.

Seppure esistano diversi tipi di plastiche in cui varia la composizione polimerica (Sadat-Shojai and Bakhshandeh, 2011), nella ricerca qui presentata ci si concentra principalmente sul polietilene tereftalato PET, principale polimero di cui ci si serve per la produzione delle bottiglie d'acqua (Container Recycling Institute, 2019) e la cui produzione è pari a poco meno di 4 milioni di tonnellate in Europa nel 2017 (Plastics Europe, 2018). Rispetto ai numeri sopra citati, questa stima evidenzia come non sia considerabile come una produzione significativa rispetto al totale, ma sicuramente un polimero largamente diffuso e facilmente reperibile. Successivamente, essendo lo scopo della ricerca quello di non sostituirsi ai circuiti di smaltimento al momento in uso, ma di inserirsi come circuito di riciclo aggiuntivo, la scelta si è indirizzata verso quelle bottiglie per cui non è previsto un nuovo futuro, investigando anche il processo del Life Cycle Assessment della plastica. In particolare, il 'fine vita' è una fase fondamentale perché offre un secondo utilizzo al prodotto attraverso il riciclo (per la generazione di un nuovo bene) o il recupero a fini energetici (Campioli and Lavagna, 2013).

Con l'introduzione della raccolta differenziata,

esistono infatti diverse opzioni di trattamento di fine vita per la bottiglia: venire lavata e riutilizzata, subire un processo denominato up-cycling con cui è trasformata in un diverso prodotto, essere trasformata in energia attraverso la combustione o, nel peggiore dei casi, invadere il pianeta sotto forma di spazzatura (Fig. 1). Nei centri di riciclaggio dunque, le bottiglie d'acqua vengono smistate, schiacciate e imballate per la spedizione a compagnie specializzate che inseriscono nelle trituratrici e vendono il prodotto ad altre aziende che producono plastiche riciclate. La plastica ridotta in granuli dà poi origine a plastiche tenere, dure o fibre che generano l'immissione di prodotti altri sul mercato. Differenti sono infatti i settori di impiego della plastica (Fig. 2), primo fra tutti gli imballaggi (circa 39,7%), il settore edilizio (19,8%), automobilistico (10,1%), elettrico ed elettronico (6,2%), fino a quello sportivo (4,1%), alimentare (3,4%) e vario (16,7%) (Plastics Europe, 2018).

Alla luce di quanto precedentemente riportato, si è quindi avviata una fase di ricognizione e catalogazione critica di differenti casi di studio, attraverso

una schedatura volta a compararne analogie, differenze, vantaggi e svantaggi, di seguito presentati, fino alla successiva proposta di un sistema costruttivo con bottiglie di plastica a funzione strutturale.

Costruire con le bottiglie: casi studio e variabili progettuali – L'idea di costruire con le bottiglie non è una novità; molti progettisti hanno sfruttato in precedenza questo materiale per la realizzazione di edifici, sviluppando metodi costruttivi basati sul riciclo e sul riutilizzo di queste tipologie di contenitori (Mansour and Ali, 2015). Ad esempio, grazie alla loro reperibilità ed economicità, le bottiglie sono potute diventare una risorsa importante nell'edilizia, soprattutto nel campo dell'autocostruzione. La ricerca ha dunque preso le mosse con una raccolta di esempi in ambito edilizio di costruzioni con le bottiglie. Al fine di sistematizzare i dati si è proceduto attraverso una lettura critica, volta a evidenziarne pregi e criticità, di casi studio precedentemente raccolti, attraverso la valutazione di alcune variabili di cui tenere conto nella scelta progettuale: il materiale, la forma, il tipo di riempimento della

bottiglia, la loro disposizione e funzione (strutturale o non) e infine il tipo di connessione tra le stesse.

Il vetro è ed è stato il tipo di materiale più diffuso per contenere liquidi. Nonostante possiedano svariate forme e dimensioni, la caratteristica comune di questi recipienti è di essere molto resistenti e, quindi, adatti a essere utilizzati come mattoni, anche nel caso in cui al loro interno non sia presente alcun tipo di contenuto. Di vetro, infatti, sono i primi esempi di case di bottiglie – cfr.: WoBo Summer House, Paesi Bassi, 1965; Bottle Houses, Canada, 1980-1984 (Fig. 3); Casa di Bottiglie, Italia, 1999. Oggigiorno gli esempi di progettazione assistita presi in esame sfruttano le bottiglie in PET come mattone, grazie alla loro versatilità, leggerezza durante il trasporto e reperibilità. Oltre al materiale, in commercio esistono bottiglie di diverse forme (Fig. 4): ciò permette di selezionare, a seconda delle caratteristiche, la tipologia e la disposizione dei contenitori più adatti al raggiungimento di un determinato scopo (Anyanka, 2011). Un esempio sono le bottiglie della Coca-Cola Company che, con la loro peculiare imboccatura conica, sono par-

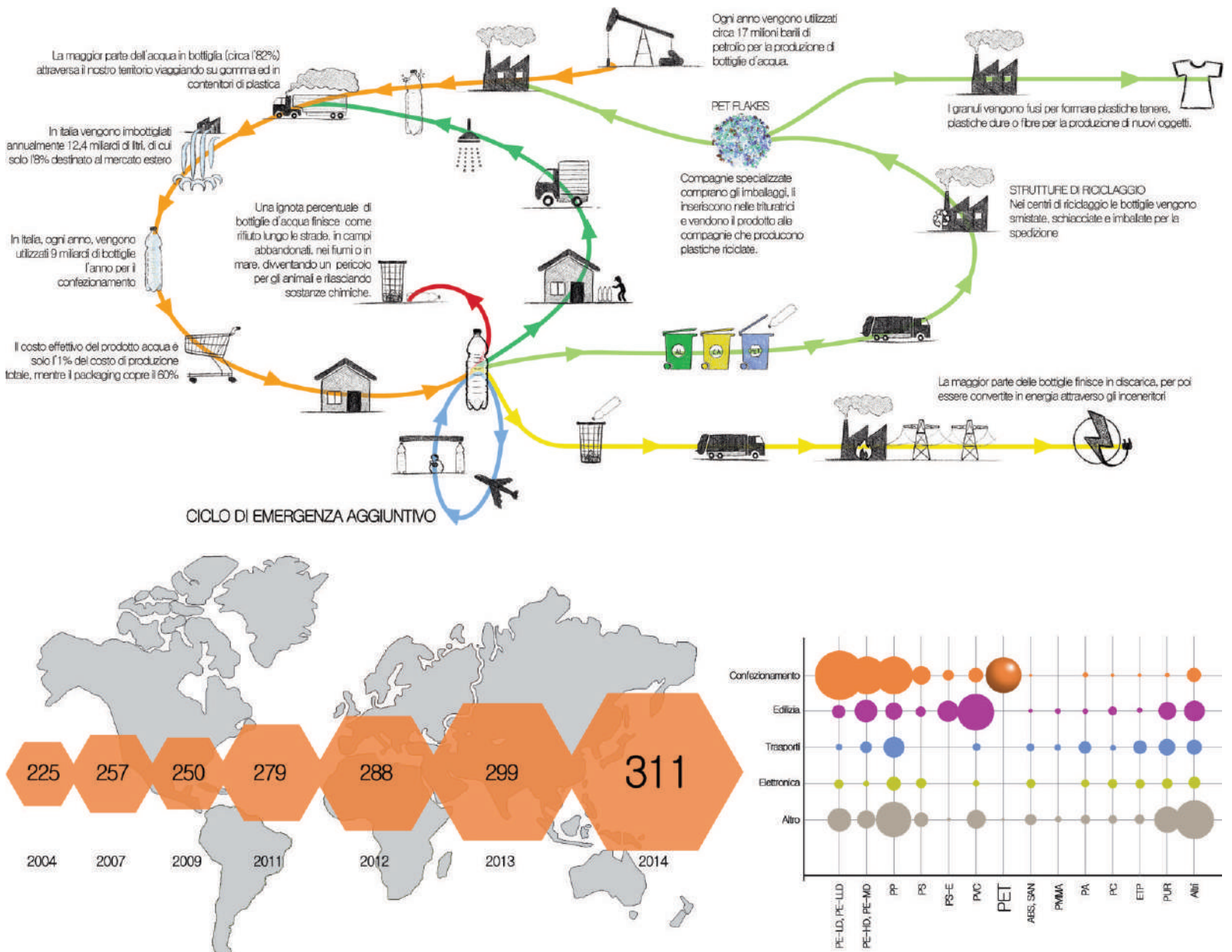


Fig. 1, 2 - Proposal for an additional emergency cycle for plastic; Production of plastic in the world in millions of tons and use of types of polymers according to the sectors.

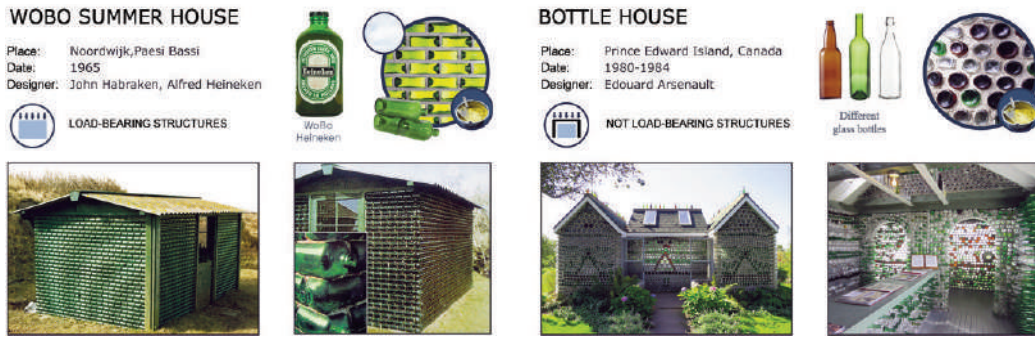


Fig. 3 - WoBo Summer House (Netherlands) and Bottle Houses (Canada): type sheet prepared for each case study analysed with respect to the considered design variables.

ticolarmente adatte alla costruzione di colonne, se vengono disposte a raggiera (cfr. Ecotec Bi4PVS, Africa, America Latina e India dal 2001; Fig. 5).

Nella maggior parte dei casi di studio analizzati, la bottiglia è vista dapprima come un contenitore e solo successivamente come materiale edilizio, ma la storia ha proposto casi in cui, fin dal momento della sua ideazione, prima ancora di essere un recipiente, il prodotto finale si presentava come un vero e proprio ‘mattoncino di emergenza’. Nel corso degli anni, sono quindi state progettate forme funzionali prima di tutto alla costruzione, in modo da non dover più scendere a compromessi con l’inefficienza dei formati presenti in commercio; la funzione di recipiente ha fornito invece il pretesto necessario per motivare la produzione e la vendita di tali bottiglie: la WoBo (World Bottle) Summer House voluta dallo stesso Heineken già nel 1960 e la United Bottle del 2007 (Fig. 6) ne sono un esempio.

Sfruttando la naturale funzione di contenitore delle bottiglie, è possibile migliorarne le prestazioni della bottiglia come materiale da costruzione secondo il tipo di riempimento utilizzato. Tra gli esempi analizzati, le bottiglie che presentano una differenziazione di riempimento sono solo quelle in PET, mentre quelle in vetro sono sempre state utilizzate vuote. Quando si parla di bottiglie vuote è opportuno però fare una distinzione tra le bottiglie non tappate – quindi effettivamente senza alcuna tipologia di contenuto – e quelle in cui si è scelto consapevolmente di intrappolare aria al loro interno (Casas de las Botellas, Argentina, 2000; Fig. 7), migliorandone così le prestazioni termiche. La scelta del tipo di riempimento è determinata inoltre dalle caratteristiche richieste al muro e dalla disponibilità del materiale (Fig. 8): peli e piume sono ottimi per l’isolamento, ma non offrono alcuna garanzia statica, al contrario della ghiaia. La terra di scavo ha il pregio di essere immediatamente reperibile e a costo zero, e le sue caratteristiche migliorano se il contenuto è setacciato; la sabbia è dunque il riempimento migliore e più utilizzato, poiché unisce capacità termiche e strutturali (Ruiz Valencia, Lopez Perez, Cortes and Froese, 2012). Particolari sono gli Eco-Bricks (Taaffe, O’Sullivan, Rahman and Pakrashi, 2014): bottiglie di plastica al cui interno si trovano rifiuti come sacchetti di patatine, imballaggi in cellophane e simili, che non sono comunemente riciclabili (cfr. Bottle Schools, Guatemala, 2009; Fig. 9).

Le bottiglie, come i mattoni, possono essere disposte con diverso orientamento rispetto alla direzione del muro, andando a incidere sullo spessore e sull’estetica, oltre che sulla sua capacità portante. Se per esempio le bottiglie sono accostate orizzon-

talmente le une alle altre con l’asse perpendicolare all’andamento del muro, si ha uno spessore maggiore del muro che sarà in grado di avere funzione portante (cfr. Casa di Bottiglie, Italia, 1999). Se invece l’asse è parallelo al piano del muro, le bottiglie possono essere sistemate verticalmente, orizzontalmente o anche in posizione obliqua, creando interessanti motivi geometrici che possono essere lasciati a vista (Wat Pa Maha Chedi Kaew, Thailandia, 1984-2004); in questo caso, però, la funzione portante è demandata a strutture più tradizionali di travi e pilastri in cemento armato, acciaio o legno, mentre il compito svolto dalle bottiglie è solo quello di tamponamento (Fig. 10).

Tranne che per casi particolari come la United Bottle, in cui la forma della bottiglia garantisce un’unione salda a incastro, i contenitori necessitano di un vincolo che li tenga in posizione. Ereditata dalla tradizione del mattone, la malta è stata il primo e più utilizzato metodo di connessione sia per la plastica che per il vetro, sostituita in alcuni casi da colle e materie resinose che svolgono la medesima funzione con prestazioni superiori e spessori inferiori. Con lo svilupparsi della progettazione assistita, si sono studiati metodi per perfezionare la connessione tra le bottiglie allo scopo di migliorare la stabilità dell’edificio. I contenitori possono quindi venire legati tra loro in modo da limitarne gli spostamenti reciproci. Questa soluzione, però, spesso non è sufficiente ed è quindi assistita dall’impiego della malta o dall’utilizzo di una tecnica che prevede la chiusura a sandwich delle bottiglie tra due strati contenitivi (Fig. 11).

Un esempio particolarmente interessante ai fini della presente ricerca è il progetto pioniero nella costruzione di strutture autoportanti in bottiglie di PET, denominato l’Ecotec BiPVS di Andreas Froese (Fig. 5) attivo in diversi Paesi in via di sviluppo fin dal 2001, supera le 50 strutture finora costruite. Diversi test, in collaborazione con la Pontificia Universidad Javeriana di Bogotá in Colombia, sono stati condotti per verificarne la resistenza e la stabilità (Ruiz Valencia et alii, 2012). Questo metodo prevede l’utilizzo di bottiglie di plastica riempite di sabbia, terra o ghiaia come materiale da costruzione e sembra essere particolarmente efficace sia strutturalmente, essendo a prova di terremoto, incendio e proiettili, sia termicamente, mantenendo una temperatura interna costante di 18-20 °C tutto l’anno. Questo sistema costruttivo prevede un metodo di impilamento in cui le bottiglie dello strato successivo vengono posizionate nell’incavo formato dalle due bottiglie sottostanti: questa soluzione crea un problema di allontanamento dovuto al peso, formando così fratture nella malta tra una

bottiglia e l’altra, e rotture nei punti in cui il muro si interrompe. Pertanto, tra le diverse forme si è preferita quella circolare, in modo che la struttura si auto equilibri e vengano costruiti dei pilastri quali elementi d’angolo e di interruzione in corrispondenza delle aperture per le porte. Le finestre, invece, sono tendenzialmente piccole con intelaiature in legno o metallo (Kusimwiragi, 2011).

La proposta di un nuovo metodo costruttivo – Partendo dalla lettura dei casi di studio, si è cercato di proporre un metodo costruttivo che potesse risolvere, almeno in parte, i problemi riscontrati nelle strutture già realizzate, con particolare attenzione a quelle che utilizzano le bottiglie con funzione portante (cfr. WoBo Summer House, Paesi Bassi, 1965; Casa di Bottiglie, Italia, 1999; Ecotec BiPVS, Africa, America Latina e India, dal 2001). Alla base di tutti i sistemi di costruzione che sfruttano materiali alternativi c’è la volontà di fornire soluzioni semplici, ma non scontate, a problemi riguardanti la difficoltà di reperimento dei materiali o l’impossibilità di impiegare le consuete tecnologie edilizie. Questi metodi meno tradizionali tentano di sfruttare al meglio le potenzialità costruttive di oggetti comunemente ritenuti di scarso valore e propongono nuove soluzioni, studiate per ovviare agli inconvenienti che l’utilizzo di materiali non convenzionali determinano.

Alla base del progetto vi è la selezione del tipo di bottiglia: in PET da 500 ml e con restringimento a circa 2/3 della sua altezza, la bottiglia è stata scelta principalmente per la sua miglior reperibilità in condizioni integre (Sharma, 2017) – essendo utilizzata soprattutto fuori casa, gettata in cestini per rifiuti indifferenziati, spesso senza essere prima schiacciata – ma anche perché la forma con restringimento è la più diffusa e presenta le migliori prestazioni meccaniche. Sfruttando questa geometria particolare è stato possibile utilizzare le bottiglie con funzione portante ovviando al problema di compressione riscontrato negli edifici già realizzati, attraverso una composizione che permetta di rispondere al meglio a questo tipo di sforzo. Il nuovo metodo costruttivo proposto prevede la creazione di un ‘mattoncino’ formato da 2 bottiglie inferiori e 2 superiori perpendicolari alle precedenti: in questo modo il problema dell’allontanamento reciproco dovuto al peso non si presenta: sfruttando la strozzatura, infatti, le quattro bottiglie del ‘mattoncino’ s’incastano le une nelle altre. La compressione, anzi, comprime le bottiglie, riducendo la possibilità di reciproco scivolamento e migliorandone l’incastro (Ferrari, 2016).

La realizzazione del muro avviene affiancando i vari mattoni, trattandoli come blocchi sago-

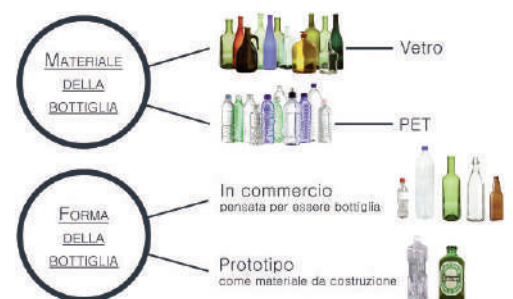


Fig. 4 - Design variables: material and shape of the bottle.



Fig. 5 - Ecotec Bi4PVS, States of Africa, Latin America and India: type sheet.

mati, simili a pezzi di un puzzle che lavorano per forma. È pertanto necessario trovare un modo per tenere unite le quattro bottiglie e poterle quindi maneggiare come un blocco unico. L'utilizzo di colla è stato immediatamente scartato, poiché rende impossibile fare piccoli aggiustamenti di posizione una volta posti in opera i 'mattoni'. È stato quindi deciso di legare tra loro le bottiglie con fil di ferro – preferito all'altra possibile soluzione che prevede l'uso di corde – per una miglior coesione (Fig. 12). Poiché le bottiglie sono posizionate in due strati perpendicolari tra loro, per realizzare la parete è sufficiente impilare i diversi blocchi; anche in questo caso la strozzatura delle bottiglie garantisce una migliore stabilità di appoggio. I mattoni sono accostati e impilati senza mai modificarne l'orientamento, anche quando cambia la direzione del muro, rendendo possibile incrociare le pareti ad angolo retto senza l'utilizzo di particolari accorgimenti (Fig. 13).

Le caratteristiche statiche del muro così composto sono implementate in base al riempimento scelto per le bottiglie. Non è possibile lasciarle vuote, sia a causa dell'eccessiva deformazione quando sottoposte a carico, sia soprattutto perché l'aria al loro interno deforma la bottiglia al variare della temperatura. Sono quindi stati presi in considerazione diversi tipi di materiali, tra cui quelli dalle ottime proprietà termiche, come peli e piume, e rifiuti secchi che però potrebbero deformarsi in maniera non uniforme se sottoposti a compressione. La scelta è quindi ricaduta su sabbia o terra di scavo, per la loro immediata reperibilità e per le buone proprietà meccaniche.

Definiti il mattone e la disposizione base, è stato quindi possibile configurare il metodo costruttivo vero e proprio caratterizzato, oltre dai mattoni, da elementi funzionali prestabiliti (irrigidimenti, copertura e finitura esterna), il cui materiale può variare a seconda della finalità, delle caratteristiche termiche ed estetiche desiderate e della sua disponibilità (Fig. 14). La costruzione della struttura inizia dalla base, costituita da uno scavo di fondazione in cui un primo corso di mattoni di bottiglie è posizionato su uno strato di terra per migliorarne l'appoggio al suolo. Si prosegue con altri corsi di mattoni, fino ad arrivare a livello del suolo; vengono quindi inseriti i montanti a intervalli regolari e infine lo scavo viene riempito di

terra, per formare una base solida e compatta per il resto della struttura (Fig. 15).

Montanti, traversi e tiranti costituiscono gli elementi di irrigidimento della struttura e impediscono gli spostamenti eccessivi delle bottiglie in caso di urti o spinte laterali, in special modo nella parte alta del muro, dove la stabilità garantita dal peso proprio delle bottiglie è inferiore. Quattro montanti verticali tenuti chiusi dai tiranti ingabbiano a intervalli regolari una singola colonna di bottiglie che diventa così un irrigidimento per la struttura, mentre i traversi tra una colonna e l'altra bloccano il resto delle bottiglie e fungono da eventuale aggancio per una pannellatura di finitura. Montanti e traversi non vanno ad aumentare lo spessore della parete, ma sono posizionati sfruttando la particolare disposizione delle bottiglie che crea una serie di spazi fisici, 'canali' in cui alloggiare montanti e traversi, e dei buchi in cui far passare i tiranti, creando così una struttura più solida e compatta (Fig. 16). Per una completa reversibilità della struttura e per garantire la possibilità di montaggi e smontaggi ciclici, montanti e traversi possono essere costituiti da profilati metallici e utilizzare barre filettate per i tiranti. Per una struttura più economica e di più facile montaggio, anche se non altrettanto reversibile, è possibile sostituire il legno ai profilati e utilizzare della corda come tirante.

Definito interamente il muro, si è posto il problema del tipo di copertura da adottare. La tipologia di muratura di bottiglie proposta, come descritto, lavora bene a compressione, mentre le spinte laterali, nonostante gli irrigidimenti, potrebbero creare dei problemi. Seppure non siano state fatte verifiche sismiche, è ragionevole pensare che si potrebbero verificare dei problemi rispetto ai quali occorrerebbe trovare una soluzione progettuale supportata da test di laboratorio che simulino l'azione sismica. Un'altra possibile criticità potrebbe derivare dalla spinta del vento sulla pannellatura, anche in questo caso da verificare. Per questi motivi sono state prese tre decisioni progettuali in relazione agli effetti del tetto sul muro. Innanzitutto, si è scelto di utilizzare un dormiente massivo, che garantisca un certo grado di compressione ai mattoni posti sulla sommità del muro che, non avendo peso sopra di loro, risulterebbero poco o per nulla deformati e con scarso attrito che li tenga uniti. Dovendo necessariamente appoggiare sulle bottiglie, il dor-

mente non è fissato ai montanti, ma solo contenuto da questi in modo da poter assecondare eventuali piccoli cedimenti nel tempo. I montanti svolgono infatti esclusivamente una funzione di contenimento (Fig. 17).

La seconda decisione vuole far fronte al problema di un momento flettente eccessivo che potrebbe portare al ribaltamento dell'ultimo strato di mattoni. La soluzione preferibile è quella di un tetto a sbalzo, il più possibile leggero e che vada a equilibrare, almeno in parte, la rotazione interno-esterno del muro. Relativamente alla tipologia di copertura è possibile fare alcune considerazioni generali: una struttura a falde permette di avere un'altezza interna superiore, ma potrebbe trasmettere al muro forze di taglio e spinte orizzontali problematiche, preferibilmente da scongiurare. Un tetto piano, che scarichi solo verticalmente, è quindi più opportuno.

A finitura della struttura è possibile aggiungere un successivo strato di pannelli leggeri che vada a racchiudere le bottiglie, in modo da garantire protezione dagli urti e conferire un aspetto più finito alla costruzione. Ad esempio, sfruttando i traversi è possibile agganciare delle finiture opache, che nascondano alla vista le bottiglie e diano al muro un aspetto più tradizionale o delle finiture trasparenti, che mantengono le bottiglie a vista pur assicurandone la sicurezza. Entrambe le soluzioni consentono un buon livello d'ispezionabilità, manutenibilità e reversibilità al pacchetto costruttivo in quanto possono anche essere rimosse in caso di necessaria verifica dello stato delle bottiglie. I materiali utilizzabili possono essere i più vari, quali legno, plastica, lamiera metallica o ceramica, purché non risultino eccessivamente pesanti (Fig. 18). Grazie a questa struttura 'a sandwich' è anche possibile implementare i requisiti prestazionali energetici del pacchetto grazie all'inserimento di uno strato d'isolamento come lana di roccia, fibre di legno o paglia prima di completarlo con la finitura esterna. È naturalmente possibile utilizzare differenti finiture per l'interno e l'esterno, in modo da adeguare le pareti interne alla funzione dell'edificio. Dato che il metodo si presta all'utilizzo di diversi materiali, è possibile creare edifici a carattere completamente diverso, da un padiglione temporaneo che mostri il metodo costruttivo a un edificio fisso dall'aspetto tradizionale (Fig. 19).

Test di laboratorio – Per validare il nuovo metodo costruttivo, che utilizza materiali non convenzionali e che sfrutta le proprietà meccaniche derivanti dalla combinazione di involucro e contenuto, è stata eseguita un'analisi f.e.m., affiancata da prove a compressione eseguite in laboratorio. Le prove hanno avuto il duplice scopo di valutare l'effettiva resistenza del 'mattone' alla compressione, finora solo ipotizzata, e verificare la corrispondenza alla realtà delle risposte fornite dal programma, in base ai dati ipotizzati come input. I calcoli sono stati eseguiti considerando i pesi complessivi delle bottiglie riempite di sabbia in accordo ai dati di progetto, pari a 2,9 kg per il singolo mattone, e il peso di un ipotetico tetto piano, pensato come una struttura leggera (ad esempio in acciaio e plexiglass). In prima ipotesi, questa scelta segue l'idea di non sovraccaricare la muratura in plastica ma è certamente possibile prevedere e sperimentare soluzioni con coperture tecnologiche più massive.

Per l'analisi statica è stata modellata una botti-

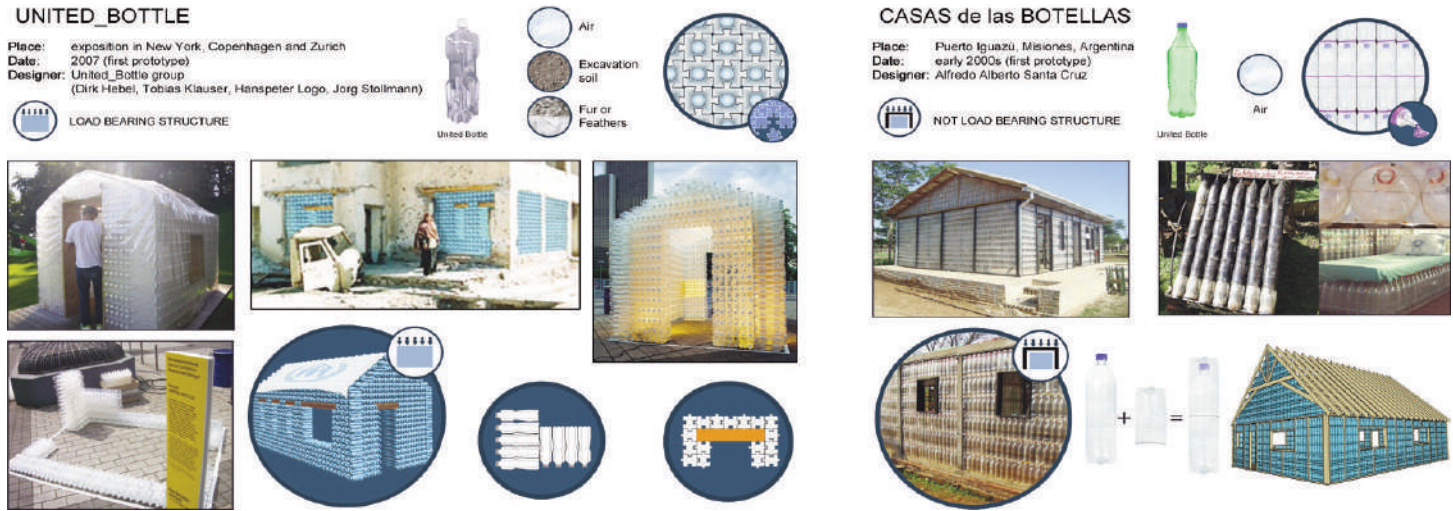


Fig. 6, 7 - United Bottle (New York, Copenhagen and Zurich): type sheet; Casas de las botellas (Argentina): type sheet.

glia base con geometria semplificata (evidenziando le superfici di appoggio), ripetuta quattro volte per creare il mattone, a sua volta ripetuto per 20 volte in modo da riprodurre una singola colonna di bottiglie facente parte del muro. Sulla superficie di appoggio dell'ultimo strato di bottiglie è stato applicato un carico pari al peso del tetto sulla singola colonna (500N). Il peso dei mattoni viene trasferito dal modello grazie all'applicazione dell'accelerazione di gravità. Alla base del primo strato di bottiglie è stata modellata una piastra, completamente vincolata, in modo da ricreare l'appoggio delle bottiglie al suolo. I valori attribuiti ai materiali della struttura esterna della bottiglia in PET sono modulo di elasticità $E = 2960 \text{ N/mm}^2$, resistenza a trazione $T = 57.3 \text{ N/mm}^2$ e carico di snervamento $Y = 57 \text{ N/mm}^2$, mentre per il riempimento interno in sabbia fine, modulo di elasticità $E = 80 \text{ N/mm}^2$. L'analisi ha evidenziato che le sollecitazioni maggiori si hanno nei punti di contatto tra le bottiglie, in particolare nelle strozzature. I valori trovati sono notevolmente inferiori ai carichi limite del PET, quindi l'integrità della bottiglia è garantita. Gli spostamenti avvengono lungo l'asse verticale e comportano una leggera riduzione in altezza della colonna. La deformazione calcolata è stata poi confrontata con le prove di laboratorio, essendo la sabbia nel modello, perfettamente compattata (Fig. 20).

Le prove sono state eseguite presso il Laboratorio strutturale dell'Eucentre di Pavia su quattro mattoni campione, preparati preventivamente riempiendo le bottiglie con sabbia finissima, compattata solo manualmente e legati con fil di ferro in modo ottenere un blocco più solidale rispetto alla connessione con una semplice corda. I mattoni sono stati suddivisi per eseguire due prove: la prima sul mattone singolo, la seconda su una colonna di tre. Utilizzando i dati di progetto, è stato calcolato un carico di esercizio agente sull'ultimo mattone della colonna di circa 100 kg. Si è quindi deciso di iniziare con questo carico per verificare la deformazione del provino; in un secondo momento, la forza agente sul mattone è stata dapprima raddoppiata, poi triplicata e infine quadruplicata per valutare la resistenza. Dopo ogni step, il carico è stato mantenuto stazionario per alcuni minuti. La compressione è stata infine aumentata fino al punto di rottura, avvenuta a 6,2 tonnellate per cedimento della plastica. La prova ha inoltre evidenziato che

la deformazione avviene solo in fase di carico e che il ruolo del fil di ferro risulta marginale, dal momento che le bottiglie vanno a compattarsi e incastrarsi le une nelle altre. Per il secondo provino, formato da tre mattoni impilati, gli step di carico si sono ripetuti identici ai precedenti e la rottura è avvenuta a 4,5 tonnellate, per cedimento della plastica di una delle bottiglie del mattone centrale.

La prova ha confermato la resistenza della struttura, già dimostrata dal calcolo f.e.m., essendo la rottura avvenuta in entrambi i casi ben oltre il carico di esercizio. Il cedimento maggiore è avvenuto per entrambi i provini nella prima fase di carico a 100 kg, probabilmente dovuto alla presenza di aria tra i granelli di sabbia nelle bottiglie, compattati solo manualmente, e non alle caratteristiche del materiale. Ciò ha permesso però un miglior assetto delle une sulle altre, incrementandone la stabilità. Nelle successive fasi di carico la deformazione si è assestata a un valore di circa 1 mm per mattone ad ogni step, valore che si è ridotto ulteriormente a 10 volte il carico di esercizio, aumentando la compattezza della sabbia all'interno delle bottiglie. Il cedimento in altezza dovuto al carico in esercizio non è quindi trascurabile e in fase di progetto è necessario tenerne conto stimando un'altezza di 7 mm in meno per ogni mattone (Fig. 21). La deformazione calcolata nell'analisi f.e.m. è stata inferiore a quella riscontrata durante la prova in laboratorio, dal momento che nel calcolo la sabbia risulta già perfettamente compattata. Con l'aumentare del carico, e quindi della compattezza della sabbia, i risultati del calcolo e della prova sono diventati maggiormente confrontabili. Si può

quindi dedurre che l'aggiunta di carichi straordinari sul tetto non comporta cedimenti eccessivi e conseguenti problemi di incastro con i traversi e i tiranti posizionati.

Conclusioni – È ormai ampiamente noto e condiviso che la produzione di rifiuti plastici sia un'emergenza ambientale. La ricerca qui presentata si è prefissata dunque lo scopo di comprendere quali potessero essere i cicli aggiuntivi di riuso delle bottiglie della plastica, pur con la consapevolezza di non avere nessuna pretesa di divenire sostitutiva rispetto ad altre ipotesi di riciclo. La proposta di un sistema costruttivo basato sulle bottiglie di plastica porta con sé altrettanto importanti valutazioni non solo ambientali ma anche circa l'implicazione sociale e culturale nell'uso della stessa. Per contro, tale metodo costruttivo permette un'interessante applicazione in differenti contesti con differenti possibilità d'uso, proponendosi come linee guida costruttive esportabili ed implementabili: da architetture di emergenza e temporanee a costruzioni più stabili, da contesti fortemente urbanizzati ai paesi del Sud del Mondo, nel rispetto del proprio contesto sociale e culturale (Chun and Brisson, 2015).

Se applicato in contesti di estrema povertà, dove la scarsità di risorse rende difficile il reperimento del materiale per la costruzione di una casa, il metodo costruttivo può essere rianalizzato, in ragione della sua natura intrinseca, attraverso due possibili distinte azioni: la prima che riprende passo passo tutte le fasi e le caratteristiche della struttura, ri-analizzando le variabili e attuando una scelta di materiali più consona alle disponibilità del luogo; la seconda volta a semplificare al massimo la struttura e la costruzione, tornando all'idea di aggregazione di base eliminando tutte le aggiunte di supporto, che garantiscono la possibilità di costruire a secco e la reversibilità dell'edificio. Rispetto alla maggior parte di casi di studio analizzati, si è proposta una soluzione costruttiva in cui la bottiglia fosse veramente impiegata a funzione portante, servendosi, nella progettazione del muro, anche dell'esperienza dei pochi casi in cui erano state condotte prove di laboratorio (cfr. Ecotec BiPVS). Questo aspetto ha permesso di scartare a priori alcune soluzioni che già negli studi pregressi si erano dimostrate carenti. Inoltre, in antitesi ri-



Fig. 8 - Design variables: type of bottle filling.



Fig. 9 - Bottle School (Guatemala and Latin America): type sheet.

spetto a molti casi di studio analizzati, che molto spesso propongono architetture con forme circolari, si è cercato di studiare una soluzione con un livello di impiegabilità tipologica e funzionale maggiormente flessibile.

Infine, la ricerca qui presentata lascia ancora ampi margini di approfondimento e verifiche in merito all'ottimizzazione del progetto del muro di plastica: modellazioni più accurate per valutare il comportamento strutturale, piuttosto che verifiche sotto azioni dinamiche, quali sismi o azioni del vento, sono ad oggi ancora temi aperti. Contestualmente potrebbe essere interessante effettuare prove di valutazione energetica dei pacchetti di chiusura verticale e orizzontale esterna, per definirne il comportamento in termini di resistenza termica, tenuta all'acqua e all'aria. Ai fini di una reale esportabilità e applicazione del metodo proposto, potrebbe essere infine interessante progettare solu-

zioni costruttive low-tech fino a una successiva ottimizzazione prestazionale con uso di materiali high-tech, a seconda del contesto specifico nel quale si opera e nel rispetto delle caratteristiche costitutive di base. Le sperimentazioni sulle tipologie dei pacchetti di copertura oppure di ottimizzazione del modulo 'mattoncino' lasciano ancora la ricerca aperta a interessanti sviluppi futuri.

ENGLISH

Italy, with 208 litres of mineral water per person, is the first European country and second in the world for bottled water consumption, with a world-wide increase in production of about 5 times since 1980 and alarming consequences on the amount of waste. World production of plastic is constantly increasing, going from 15 million in 1964 to the current 340 million (World Economic Forum et alii, 2018) of which Asia produces about 50% and, only China, about 29% (Plastics Europe, 2018). Europe is the second largest producer of plastics, with its 60 million tons, about 20% of world production. Since the fifties of the last century, with the start of the widespread use of plastic, 8.3 billion tons of plastic have been produced, throwing about 6.3 billion in nature. Even if only the production trend remains unchanged, it is estimated that the amount of plastic waste in 2050 could reach 34 billion tons of which at least 12 tons would constitute scattered waste.

To date only 9% of plastic is recycled, 12% incinerated while 79% ends up in landfills and in natural environments (Geyer, Jambeck and Law, 2017). From 1990 up today, consumption has steadily grown (+ 5% per year) and European consumer demand is increasing in parallel with production. Faced with this exponential growth from year to year, Gaëlle Gourmelon (2015) of the Worldwatch Institute explains how recovery and recycling remain insufficient, since most of the plastic ends up in landfills and, above all, in the oceans. It is estimated that, every year, 1.15 to 2.41 million tons of plastic (Lebreton, 2018), mainly polyethylene (PE) or polypropylene (PP) (Chen, 2017) enter the oceans and there are five islands of plastic floating in the oceans, the largest of these, in the Pacific of about 80,000 tons.

Europe plastic consumption is on average 31 kilos per year per capita; Italy is the seventh Euro-

pean country in terms of plastic waste generation per capita, with around 35 kilos per year, most of which for packaging use. This sector holds the record for the greatest use of plastic, immediately followed by the building one. This environmental emergency highlights a strong responsibility of the society that must necessarily cope with the ever-growing need to properly dispose of plastic. If we consider only the building sector, the use of plastic is widespread not only in relation to the production of building materials (insulation, pipes, frames, etc.) but also in the entire building process: storage and packaging of the material and transport.

The designers, not only as citizens but also as the main actors in building policies, have the great responsibility to find new strategies to limit the use of plastic and, at the same time, to imagine new forms of reuse. From this background, the research started with the aim of reusing plastic for building purposes. Methodologically, the first phase of the research was focused on outlining and knowing the topic, in particular through the study of its historical and evolutionary process, and then dwell on the different typologies. The question arose as to which type of plastic was the most suitable and most readily available for re-use. The choice was finally focused on the 500 ml bottles, frequently and widely used, and whose life cycle is very often very short: the bottle is consumed and thrown intact in its original form.

Although there are different types of plastics in which the polymer composition varies (Sadat-Shojai and Bakhshandeh, 2011), the research presented here focuses mainly on PET polyethylene terephthalate, the main polymer used to produce water bottles (Container Recycling Institute, 2019) and whose production amounts to just under 4 million tons in Europe in 2017 (Plastics Europe, 2018). Compared to the numbers mentioned above, this estimation shows that it is not as a significant production as respect to the total, but certainly a widely diffused and easily available polymer. Subsequently, since the aim of this research was not to replace the disposal circuits currently in use, but to become an additional recycling circuit, the choice was directed towards those bottles for which a new future is not foreseen, also investigating the process of the Life Cycle Assessment of plastic. In particular, the 'end of life' is a fundamental phase because it offers a second use to the product through recycling (for the generation of a new good) or recovery for energy purposes (Capioli and Lavagna, 2013).

With the introduction of separate waste collection, there are several end-of-life treatment options for bottle: washed and reused, a process called up-cycling, with which it is transformed into a different product, transformed into energy through combustion or, at worst, invade the planet in the form of garbage (Fig. 1). In recycling centres, therefore, the bottles are sorted, crushed and packed for shipment to specialized companies that insert into the shredders and sell the product to other companies that recycle raw materials. The plastic reduced in granules then can be transformed into soft plastic, hard plastic or fibers that generate the release of other products on the market. The sectors of use of plastic are different (Fig. 2): first of all the packaging (about 39.7%), the building and construction sector (19.8%), automotive (10.1%), electrical and electronic (6.2%), leisure and sports (4.1%), food

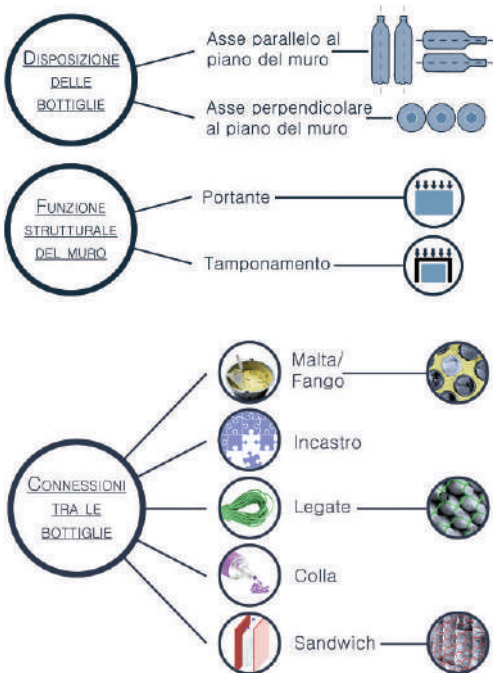


Fig. 10, 11 - Design variables: Arrangement of the bottles and structural function or not; Connections between the bottles.

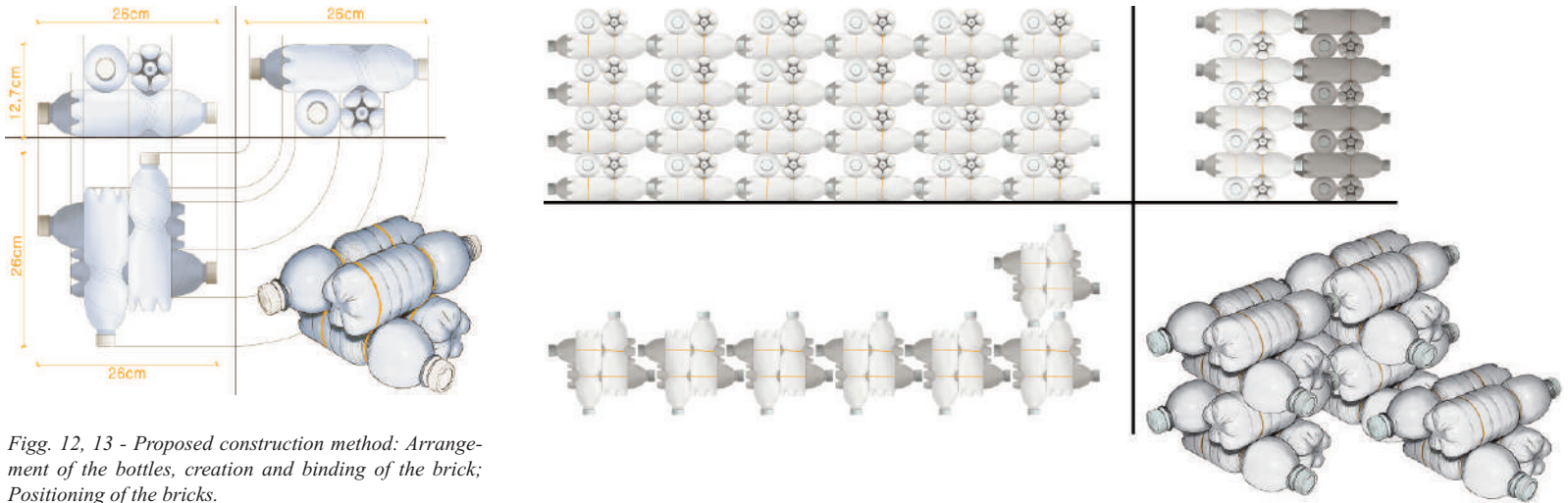


Fig. 12, 13 - Proposed construction method: Arrangement of the bottles, creation and binding of the brick; Positioning of the bricks.

and agriculture (3.4%) and others (16.7%) (Plastics Europe, 2018).

In light of the above, a critical recognition and cataloguing phase of different case studies was launched, aimed at comparing similarities, differences, advantages and disadvantages, presented below, until the proposal of a new construction system with plastic bottles with a structural function.

Building with bottles: case studies and design variables – The idea of building with bottles is nothing new; many designers have previously exploited this material for the construction of buildings, developing construction methods based on recycling and re-use of these types of containers (Mansour and Ali, 2015). For example, thanks to their availability and cheapness, the bottles could become an important resource in the building sector, especially in the field of self-construction. The research has therefore started with a collection of examples in the construction of buildings with bottles. In order to systematize the data we proceeded through a critical reading, aimed at highlighting its merits and critical points, of previously collected case studies, through the evaluation of some variables to be taken into account in the design choice: the material, the form, the type of filling the bottle, their arrangement and function (structural or not) and finally the type of connection between them.

Glass is, and has been, the most common type of material to contain liquids. Despite possessing various shapes and sizes, the common characteristic of these containers is that they are very resistant and, therefore, suitable for use as bricks, even if there is no type of content inside them. In fact, they are the first examples of houses made of bottles – see: *WoBo Summer House*, Netherlands, 1965; *Bottle Houses*, Canada, 1980-1984 (Fig. 3); *Casa di Bottiglie*, Italy, 1999. Nowadays, the assisted design examples examined use PET bottles as a brick, thanks to their versatility, lightness during transport and availability. In addition to the material, there are bottles of different shapes available on the market (Fig. 4): this makes it possible to select, depending on the characteristics, the type and arrangement of the most suitable containers for achieving a specific purpose (Anyanka, 2011). An example is the bottles of the Coca-Cola Company which, with their peculiar conical mouth, are particularly suitable for the construction of columns, if they are arranged radially (see: *Ecotec Bi4PVS*,

Africa, Latin America and India since 2001; Fig. 5).

In most of the analysed case studies, the bottle is first seen as a container and only later as building material, but history has proposed cases in which, from the moment of its conception, even before being a container, the final product it presented itself as a real ‘emergency brick’. Over the years, functional forms have therefore been designed first of all for the construction, so as to no longer have to compromise with the inefficiency of the formats available on the market; the function of container has instead provided the necessary pretext to motivate the production and sale of these bottles: the *WoBo (World Bottle) Summer House* wanted by the same Heineken already in 1960 and the *United Bottle of 2007* (Fig. 6) are some examples.

Taking advantage of the natural function of holding the bottles, it is possible to improve the performance of the bottle as a building material according to the type of filling used. Among the examples analysed, the bottles that have a filling differentiation are only those in PET, while those in glass have always been used empty. When we talk about empty bottles, however, it is appropriate to make a distinction between uncapped bottles – therefore effectively without any type of content – and those in which we consciously chose to trap air inside them (*Casas de las Botellas*, Argentina, 2000; Fig. 7), thus improving its thermal performance. The choice of the type of filling is also determined by the characteristics required of the wall and the availability of the material (Fig. 8): hair and feathers are excellent for insulation, but do not offer any static guarantee, unlike gravel. The excavation ground has the advantage of being immediately available and at no cost, and its features improve if the content is sieved; sand is therefore the best and most used filling, because it combines thermal and structural capabilities (Ruiz Valencia, Lopez Perez, Cortes and Froese, 2012). Particular are the *Eco-Bricks* (Taaffe, O’Sullivan, Rahman and Pakrashi, 2014): plastic bottles containing waste such as bags of chips, cellophane packaging and the like, which are not commonly recyclable (see *Bottle Schools*, Guatemala, 2009; Fig. 9).

The bottles, like bricks, can be arranged with different orientation with respect to the direction of the wall, going to affect the thickness and aesthetics, as well as its bearing capacity. If, for example, the bottles are placed horizontally next to

each other with the axis perpendicular to the course of the wall, there is a greater thickness of the wall that will be able to have a supporting function (see *Casa di Bottiglie*, Italy, 1999). If, on the other hand, the axis is parallel to the wall plane, the bottles can be arranged vertically, horizontally or even in an oblique position, creating interesting geometric patterns that can be left exposed (*Wat Pa Maha Chedi Kaew*, Thailand, 1984-2004); in this case, however, the load-bearing function is entrusted to more traditional structures of beams and pillars in reinforced concrete, steel or wood, while the task performed by the bottles is only the infill (Fig. 10).

Except for special cases such as the *United Bottle*, in which the shape of the bottle guarantees a firm and interlocking union, the containers need a constraint that keeps them in place. Inherited from the brick tradition, the mortar was the first and most used method of connection for both plastic and glass, replaced in some cases by glues and resinous materials that perform the same function with superior performance and lower thicknesses. With the development of assisted design, methods have been studied to improve the connection between bottles in order to improve the stability of the building. The containers can then be tied together so as to limit their reciprocal movements. This solution, however, is often not sufficient and is therefore assisted by the use of the mortar or the use of a technique that involves the sandwich closing of the bottles between two containing layers (Fig. 11).

A particularly interesting example for the purposes of this research is the pioneer project in the construction of self-supporting structures in PET bottles, called the *Ecotec BiPVS* by Andreas Froese (Fig. 5) active in various developing countries since 2001, exceeding the 50 structures so far built. Several tests, in collaboration with the *Pontificia Universidad Javeriana of Bogotá* in Colombia, have been conducted to verify its resistance and stability (Ruiz Valencia et alii, 2012). This method involves the use of plastic bottles filled with sand, earth or gravel as a building material and seems to be particularly effective both structurally, being earthquake-proof, fire and bullets, and thermally, maintaining a constant internal temperature of 18-20 °C all year. This construction system provides a stacking method in which the bottles of the next layer are placed in the recess formed by the two bottles below: this solution cre-

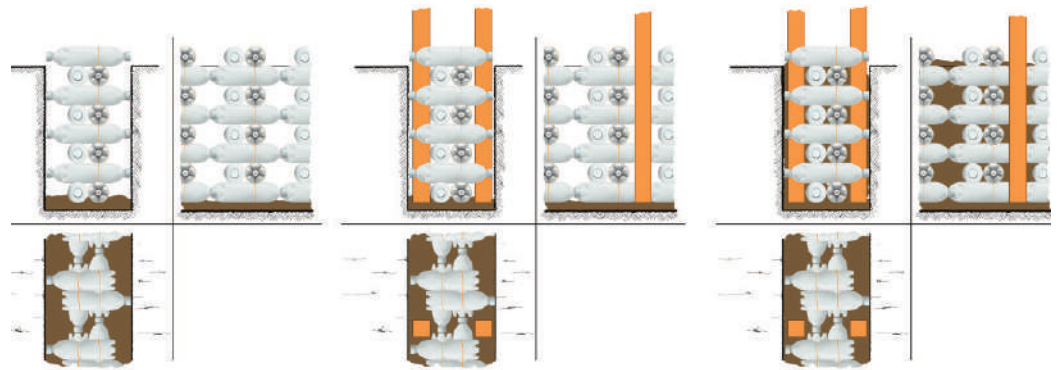
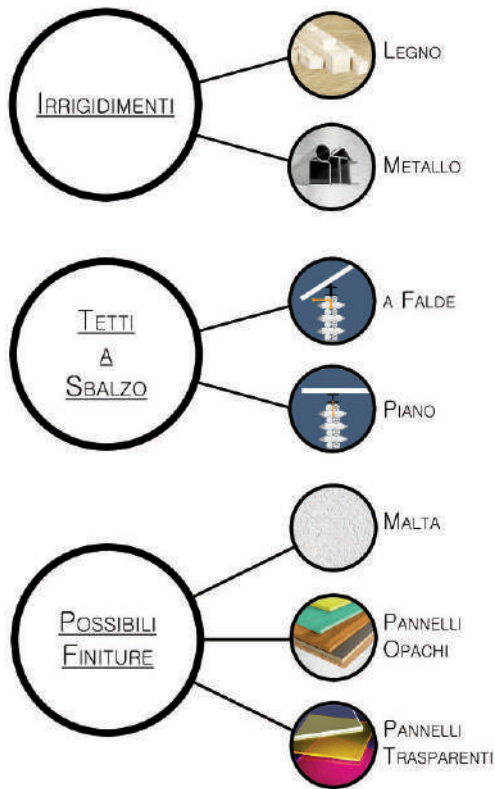


Fig. 14, 15 - Proposed construction method: Design choices; Construction of the base of the wall.

ates a problem of removal due to weight, thus forming fractures in the mortar between one bottle and another, and breakages at the points where the wall stops. Therefore, among the various forms, the circular one was preferred, so that the structure self-balances and pillars are constructed as corner and break elements at the openings for the doors. The windows, instead, tend to be small with wooden or metal frames (Kusimwiragi, 2011).

The proposal for a new construction method – Starting from the reading of the case studies, an attempt was made to propose a constructive method that could solve, in part at least, the problems encountered in structures already built, with particular attention to those that use bottles with load-bearing function (see WoBo Summer House, Netherlands, 1965; Casa di Bottiglie, Italy, 1999; Ecotec BiPVS, Africa, Latin America and India, since 2001). At the base of all the construction systems that use alternative materials is the desire to provide simple, but not obvious, solutions to problems concerning the difficulty of finding materials or the impossibility of using the usual building technologies. These less traditional methods try to make the most of the constructive potential of objects commonly considered to be of low value and propose new solutions, designed to overcome the drawbacks that the use of unconventional materials determine.

At the base of the project is the selection of the bottle type: in PET of 500 ml and with shrinkage at about 2/3 of its height, the bottle was chosen mainly for its best availability in intact conditions (Sharma, 2017) – being used above all outside the home, thrown in baskets for undifferentiated waste, often without being first crushed – but also because the shape with narrowing is the most widespread and has the best mechanical performances. Taking advantage of this particular geometry it has been possible to use the bottles with

load-bearing function, obviating the problem of compression found in buildings already constructed, through a composition that allows to better respond to this type of effort. The new construction method proposed involves the creation of a 'brick' formed by 2 lower bottles and 2 upper ones perpendicular to the previous ones: in this way the problem of mutual removal due to weight does not occur: using the bottleneck, in fact, the four bottles of the 'brick' they fit into each other. The compression, in fact, pack the bottles, reducing the possibility of mutual slipping and improving the joint (Ferrari, 2016).

The construction of the wall takes place putting alongside the various bricks, treating them as shaped blocks, similar to pieces of a puzzle that work by shape. It is therefore necessary to find a way to hold the four bottles together and then be able to handle them as a single block. The use of glue was immediately discarded, as it makes it impossible to make small adjustments to the position once the bricks have been laid. It was therefore decided to tie together the bottles with wire – preferred to the other possible solution that involves the use of ropes – for better cohesion (Fig. 12). Since the bottles are positioned in two layers perpendicular to each other, to make the wall it is sufficient to stack the different blocks; also, in this case the choking of the bottles guarantees a better stability of support. The bricks are juxtaposed and stacked without ever changing their orientation, even when the direction of the wall changes, making it possible to cross the walls at right angles without using special devices (Fig. 13).

The static characteristics of the wall thus composed are implemented based on the filling chosen for the bottles. It is not possible to leave them empty, either because of excessive deformation when subjected to load, or above all because the air inside them deforms the bottle as the temperature changes. Different types of materials have therefore been taken into consideration, including those with excellent thermal properties, such as hair and feathers, and dry waste which could deform unevenly if subjected to compression. The choice therefore fell on sand or excavated earth, due to their immediate availability and good mechanical properties.

Once the brick and the basic layout were defined, it was therefore possible to configure the real construction method, which is characterized, in addition to the bricks, by pre-established functional elements (stiffening, roofing and external finishing), whose material may vary depending on the

purpose, characteristics desired thermal and aesthetic properties and its availability (Fig. 14). The construction of the structure starts from the base, constituted by a foundation excavation in which a first course of bottle bricks is positioned on a layer of earth to improve its support on the ground. Continue with other brick courses until you reach ground level; the uprights are then inserted at regular intervals and finally the excavation is filled with earth, to form a solid and compact base for the rest of the structure (Fig. 15).

Uprights, crossbars and tie rods constitute the elements of stiffening of the structure and prevent excessive movement of the bottles in the event of impacts or lateral thrusts, especially in the upper part of the wall, where the stability guaranteed by the weight of the bottles is lower. Four vertical uprights kept closed by the tie rods cage at regular intervals a single column of bottles which thus becomes a stiffening for the structure, while the crosspieces between one column and another block the rest of the bottles and act as an eventual coupling for finishing panels. Uprights and crosspieces do not increase the thickness of the wall, but are positioned by taking advantage of the particular arrangement of the bottles which creates a series of physical spaces, 'channels' in which to house uprights and crosspieces, and holes in which the tie rods pass, creating thus a more solid and compact structure (Fig. 16). For a complete reversibility of the structure and to guarantee the possibility of assembling and dismantling cyclical, uprights and crossbars can be made up of metal profiles and use threaded rods for tie rods. For a more economical and easier to assemble structure, even if not equally reversible, it is possible to replace the wood to the profiles and to use the rope as a tie rod.

Having defined the entire wall, the problem of the type of coverage to be adopted was posed. The proposed type of bottle masonry, as described, works well in compression, while lateral thrusts, despite stiffening, could create problems. Although no seismic checks have been made, it is reasonable to think that problems could occur with respect to which it would be necessary to find a design solution supported by laboratory tests that simulate the seismic action. Another possible criticality could derive from the wind pressure on the panelling, also in this case to be verified. For these reasons, three design decisions have been taken in relation to the effects of the roof on the wall. First of all, we have chosen to use a massive sleeper, which guarantees a certain degree of compression to the

bricks placed on the top of the wall which, having no weight above them, would be little or not at all deformed and with little friction to keep them together. Having to rest on the bottles, the sleeper is not fixed to the uprights, but only contained by these so as to be able to accommodate any small failure over time. The uprights in fact perform exclusively a containment function (Fig. 17).

The second decision aims to tackle the problem of an excessive bending moment that could lead to the overturning of the last layer of bricks. The preferable solution is that of a cantilevered roof, as light as possible and which goes to balance, at least in part, the internal-external rotation of the wall. With regard to the type of roofing, it is possible to make some general considerations: a pitched structure allows for a higher internal height, but it could transmit to the wall cutting forces and problematic horizontal thrusts, preferably to be avoided. A flat roof, which only drains vertically, is therefore more appropriate.

To complete the structure, it is possible to add a subsequent layer of light panels that enclose the bottles, so as to guarantee protection against impacts and give the building a more finished appearance. For example, by using the crosspieces, it is possible to hook up the matt finishes, which hide the bottles from view and give the wall a more traditional look or transparent finishes, which keep the bottles in sight while ensuring their safety. Both solutions allow a good level of inspectability, maintainability and reversibility to the construction package as they can also be removed in case of necessary verification of the condition of the bottles. The materials that can be used can be the most varied, such as wood, plastic, metal sheet or ceramic, as long as they are not excessively heavy (Fig. 18). Thanks to this 'sandwich' structure, it is also possible to implement the energy performance requirements of the package thanks to the insertion of an insulation layer such as rock wool, wood or straw fibers before completing it with the external finish. It is of course possible to use different finishes for the interior and exterior; so as to adapt the interior walls to the function of the building. Since the method lends itself to the use of different materials, it is possible to create buildings of a completely different nature, from a temporary pavilion that shows the construction method to a fixed building with a traditional appearance (Fig. 19).

Laboratory tests – To validate the new construction method, which uses unconventional materials, and which exploits the mechanical properties deriving from the combination of envelope and content, an f.e.m. analysis was performed, accompanied by compression tests carried out in the laboratory. The tests had the dual purpose of evaluating the effective resistance of the 'brick' to the compression, so far only hypothesized, and verifying the correspondence to the reality of the answers provided by the program, based on the data hypothesized as input. The calculations were performed considering the total weight of the sand filled bottles according to the design data, equal to 2.9 kg for the single brick, and the weight of a hypothetical flat roof, designed as a light structure (for example in steel and plexiglas). In the first hypothesis, this choice follows the idea of not overloading the plastic masonry, but it is certainly pos-

sible to predict and experiment with solutions with more massive technological coverings.

For the static analysis a basic bottle has been modelled with a simplified geometry (highlighting the supporting surfaces), repeated four times to create the brick, in turn repeated 20 times in order to reproduce a single column of bottles forming part of the wall. On the support surface of the last layer of bottles a load was applied equal to the weight of the roof on the single column (500N). The weight of the bricks is transferred from the model thanks to the application of gravity acceleration. At the base of the first layer of bottles a plate was modelled, completely constrained, in order to recreate the support of the bottles on the ground. The values attributed to the materials of the external structure of the PET bottle are modulus of elasticity $E = 2960 \text{ N/mm}^2$, tensile strength $T = 57.3 \text{ N/mm}^2$ and yield strength $Y = 57 \text{ N/mm}^2$, while for internal filling in sand fine, modulus of elasticity $E = 80 \text{ N/mm}^2$. The analysis showed that the greatest stresses occur at the points of contact between the bottles, particularly in the bottlenecks. The values found are considerably lower than the limit loads of PET, so the integrity of the bottle is guaranteed. The displacements take place along the vertical axis and involve a slight reduction in height of the column. The calculated deformation was then compared with the laboratory tests, the sand being perfectly compacted in the model (Fig. 20).

The tests were performed at the Structural Laboratory of the Eucentre in Pavia on four sample bricks, prepared in advance by filling the bottles with very fine sand, compacted only manually and tied with wire so as to obtain a more solid block than the connection with a simple rope. The bricks were divided to perform two tests: the first on a single brick, the second on a column of three. Using the design data, an operating load acting on the last brick of the column of about 100 kg was calculated. It was therefore decided to start with this load to verify the deformation of the specimen; at a later time, the force acting on the brick was

first doubled, then tripled and finally quadrupled to assess its resistance. After each step, the load was kept stationary for a few minutes. Finally, the compression was increased to the breaking point, which occurred at 6.2 tons due to plastic failure. The test also showed that the deformation occurs only during the loading phase and that the role of the wire is marginal, since the bottles go to compact and fit together. For the second specimen, consisting of three stacked bricks, the loading steps were repeated identical to the previous ones and the break occurred at 4.5 tons, due to the plastic collapse of one of the central brick bottles.

The test confirmed the strength of the structure, already demonstrated by the calculation f.e.m., as the break occurred in both cases well beyond the operating load. The greater failure occurred for both specimens in the first loading phase at 100 kg, probably due to the presence of air between the grains of sand in the bottles, compacted only manually, and not to the characteristics of the material. This allowed, however, a better settlement of one on the other, increasing its stability. In the subsequent loading phases the deformation has settled at a value of about 1 mm per brick at each step, a value which has been further reduced to 10 times the operating load, increasing the compactness of the sand inside the bottles.

The failure in height due to the load in operation is therefore not negligible and in the design phase it is necessary to take this into consideration estimating a height of 7 mm less for each brick (Fig. 21). The deformation calculated in the analysis f.e.m. it was lower than that found during the laboratory test, since the sand is already perfectly compacted in the calculation. As the load and therefore the compactness of the sand increase, the results of the calculation and the test have become more comparable. It can therefore be deduced that the addition of extraordinary loads on the roof does not lead to excessive failure and consequent problems of interlocking with the crossbars and tie rods positioned.

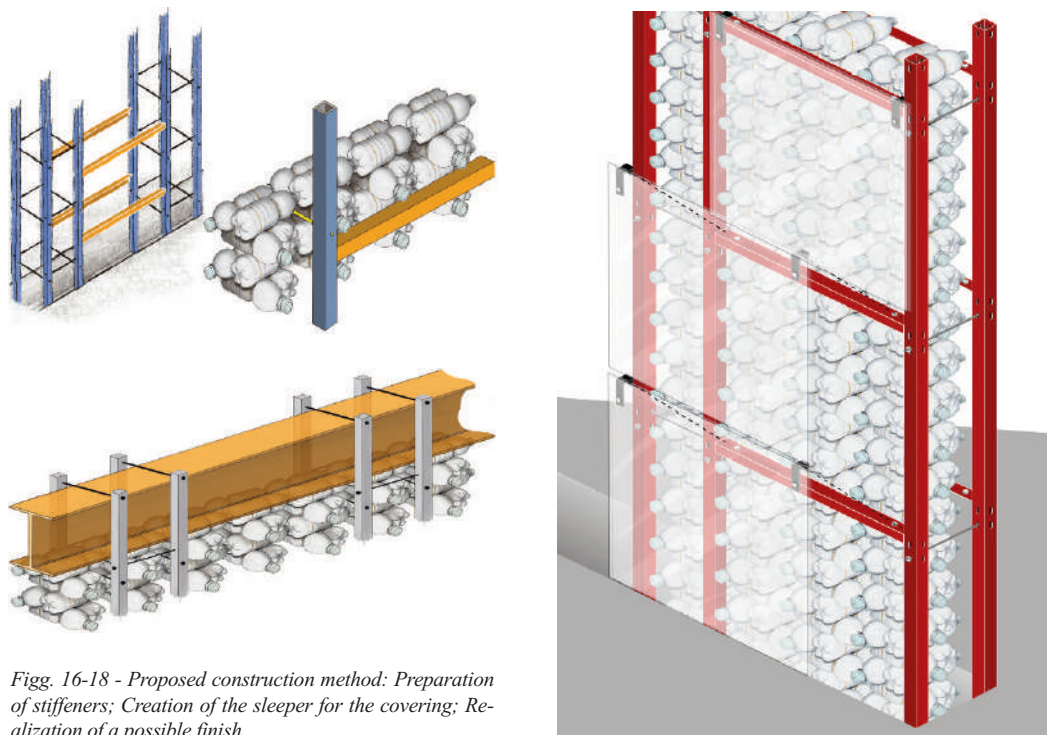


Fig. 16-18 - Proposed construction method: Preparation of stiffeners; Creation of the sleeper for the covering; Realization of a possible finish.



Conclusions – It is now widely known and accepted that the production of plastic waste is an environmental emergency. The research presented here has therefore set itself the goal of understanding what could be the additional cycles of reusing plastic bottles, even with the knowledge that they have no claim to become a substitute for other recycling hypotheses. The proposal of a constructive system based on plastic bottles brings with it equally important assessments not only environmental but also about the social and cultural implication on its use. On the other hand, this constructive method allows an interesting application in different contexts with different possibilities of use, proposing itself as exportable and implementable constructive guidelines: from emergency and temporary architectures to more stable constructions, from highly urbanized contexts to Global South, respecting its social and cultural context (Chun and Brisson, 2015).

If applied in contexts of extreme poverty, where the scarcity of resources makes it difficult to find material for the construction of a house, this method can be re-analysed, due to its intrinsic nature, through two possible distinct actions: the first that takes over step by step all the phases and characteristics of the structure, re-analysing the variables and implementing a choice of materials more suited to the availability of the place; the second time to simplify the structure and construction as much as possible, returning to the idea of basic aggregation by eliminating all the support additions, which guarantee the possibility of building dry and the reversibility of the building. Compared to most of the case studies analysed, a constructive solution was proposed in which the bottle was really used as a load-bearing function, exploiting, in the design of the wall, also the experience of the few cases in which laboratory tests had been conducted (see Ecotec BiPVS). This aspect made it possible to discard some solutions that had already been lacking in prior studies. Moreover, in contrast to many analysed case studies, which very often propose architectures with circular shapes, we tried to study a solution with a more flexible level of typological and functional employability.

Finally, the research presented here still leaves ample margins for further investigation and verification regarding the optimization of the plastic wall design: more accurate modelling to evaluate structural behaviour, rather than checks under dynamic actions, such as earthquakes or wind actions, are to date still open topics. At the same time, it could be interesting to carry out tests of energy evaluation of the external vertical and horizontal closure packages, to define their behaviour in terms of thermal resistance, water and air tightness. For the purpose of a real exportability and application of the proposed method, it could finally be interesting to design low-tech constructive solutions up to a subsequent performance optimization with the use of high-tech materials, depending on

the specific context of the project and in respect of the characteristic's basic constitutive elements. Experiments on the types of coverage packages or optimization of the 'brick' module still leave the research open to interesting future developments.

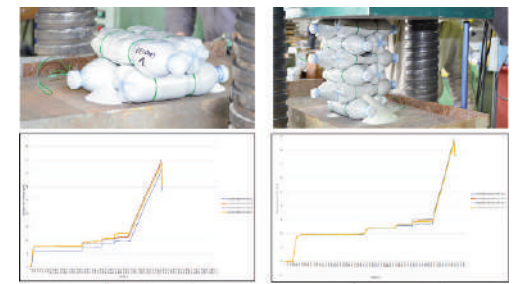
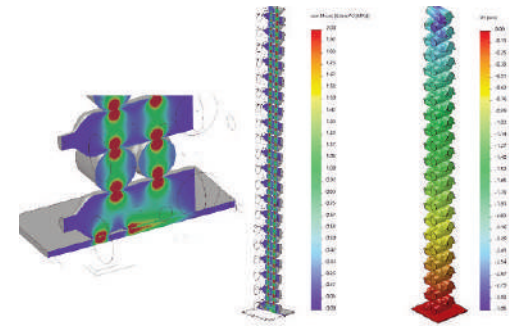
ACKNOWLEDGEMENTS

The proposed research, starting from the recognition of the state of the art up to the formulation of the construction method, was conducted personally by the Authors of the paper while the test was performed, under the supervision of the authors, at the Eucentre Laboratory in Pavia with the collaboration of eng. R. Franzolin and of eng. S. Girello.

Credits for all images: Ferrari, C. (2016), *Progettare con le bottiglie di plastica: proposta per un padiglione a città del Messico*, Master Degree Thesis in Engineering and Architecture, Supervisor Prof. Daniela Besana, University of Pavia (Italy).

REFERENCES

Anyanka, U. (2011), *Nigeria recycles plastic bottle, into housing!* [Online] available at: <https://greennigeria.wordpress.com/2011/08/12> [Accessed 10 April 2019].
 Campioli, A. and Lavagna, M. (2013), "Innovazione ambientale dei processi di trasformazione del costruito e ciclo di vita", in *Techne | Environment Emergency*, vol. 5, pp. 66-73.
 Chen, Q. et alii (2017), "Pollutants in Plastics within the North Pacific Subtropical Gyre", in *Environmental Science and Technology*, vol. 52, n. 2, pp. 446-456. [Online] available at: <http://doi.org/10.1021/acs.est.7b04682> [Accessed 29 April 2019].
 Chun, A. M. S. and Brisson, I. E. (2015), *Ground Rules in Humanitarian Design*, John Wiley & Sons, New Jersey.
 Container Recycling Institute, *Plastic Facts & Statistics*. [Online] available at: <http://www.container-recycling.org/index.php/factsstatistics/plastic> [Accessed 10 April 2019].
 Ferrari, C. (2016), *Progettare con le bottiglie di plastica: proposta per un padiglione a città del Messico*, Master Degree Thesis in Engineering and Architecture, Università di Pavia.
 Geyer, R., Jambeck, J. R. and Law, K. L. (2017), "Production, use and fate of all plastic ever made", in *Science Advances*, vol. 3, n. 7, pp. 1-5. [Online] available at: <https://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782> [Accessed 10 April 2019].
 Kusimwiragi, K. (2011), *Investigating the Compressive Strength of Plastic Bottles as Masonry*, Uganda University. [Online] available at: https://www.eco-tecnologia.com/phocadownload/descargas/k.kalumire_thesis.pdf [Accessed 29 April 2019].
 Mansour, A. M. and Ali, S. A. (2015), "Reusing waste plastic bottle as an alternative sustainable building material", in *Energy for Sustainable Development*, vol. 24, pp. 79-85.
 Lebreton, L. C. M. et alii (2018), "Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic", in *Scientific Reports* 8, article n. 4666. [Online] available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22939-w> [Accessed 29 April 2019].
 Plastics Europe (2018), *Plastics: the facts 2018. An analysis of European plastics production, demand and waste data*. [Online] available at: https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/plastics_the_facts_2018-afweb [Accessed 29/04/2019].



	Carico	Forza applicata [daN]	Cedimento Totale [mm]	Cedimento medio per 'mattoncino' [mm]	Cedimento relativo [mm]
Provino 1	di esercizio	100	7,68		7,68
	x2	200	9,12		1,44
	x3	300	10,16		1,04
	x4	400	11,21		1,05
	x10	1000	14,93		7,25
	rottura	6225	37,54		30,16
Provino 2	di esercizio	100	10,23	6,41	9,41
	x2	200	23,86	7,95	1,57
	x3	300	26,03	8,66	0,73
	x4	400	28,54	9,51	0,53
	x10	1000	39,36	13,2	0,79
	rottura	4497	62,21	27,40	20,99

Fig. 19-21 - Proposed construction method: Exportability of the method; Calculations of stresses and displacements; Laboratory test verification.

Ruiz Valencia, D., Lopez Perez, C., Cortes, E. and Froese, A. (2012), "Nuevas alternativas en la construcción: botellas PET con relleno de tierra", in *Apuntes: Revista de Estudio sobre Patrimonio Cultural-Journal of Cultural Heritage Studies*, vol. 25, issue 2, pp. 292-303.
 Sadat-Shojai, M. and Bakhshandeh, G. R. (2011), "Recycling of PVC wastes", in *Polymer Degradation and Stability*, vol. 96, pp. 404-415.
 Sharma, H. (2017), "Innovative and Sustainable Application of PET Bottle as a Green Construction Overview", in *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, issue 16, pp. 1-6.
 Taaffe, J., O'Sullivan, S., Rahman, M. E. and Pakrashi, V. (2014), "Experimental characterization of Polyethylene Terephthalate (PET) bottle Eco-bricks" in *Materials & Design*, vol. 60, pp. 50-56.
 World Economic Forum, Ellen Mac Arthur Foundation and Mc Kinsey Company (2016), *The New Plastic Economy: Rethinking the future of plastic*. [Online] available at: www.ellenmacarthurfoundation.org [Accessed 14 February 2019].

^a DANIELA BESANA, Engineer-Architect and PhD, she is Associate Professor at the DICAr Department of the University of Pavia (Italy). She carries out research on the recovery and re-use of cultural heritage, with reference to construction technologies and design strategies. Tel. +39 (0)382/98.54.04. E-mail: daniela.besana@unipv.it

^b CLAUDIA FERRARI, Engineering-Architecture, she works as a freelancer mainly performing f.e.m. and structural calculations d.b.a. and a code for engineering studies. Mob. +39 348/81.36.706. E-mail: clo88@hotmail.it