



INNOVAZIONE DEI MATERIALI NATURALI TERRA E NANOTUBI DI ARGILLA PER UNA SFIDA SOSTENIBILE

NATURAL MATERIAL INNOVATION EARTH AND HALLOYSITE NANOCLAY FOR A SUSTAINABLE CHALLENGE

Cesare Spósito^a, Francesca Scalisi^b

ABSTRACT

All'interno del dibattito culturale che vede la questione ambientale come prioritaria e con riferimento a studi e ricerche che negli ultimi anni hanno promosso materiali compositi a base di terra cruda, gli Autori, consapevoli della necessità che il rapporto fra Progetto e Materia debba assumere una nuova centralità supportato dalle specificità della Tecnologia dell'Architettura, illustrano le risultanze di una sperimentazione che ha l'obiettivo di migliorare le prestazioni della terra cruda con l'apporto delle nanotecnologie, sviluppando un 'nuovo materiale' con una ridotta embodied energy e una ridotta quantità di emissioni di CO₂ in atmosfera.

Within the cultural debate that considers the environmental issue as a priority and with reference to the studies and researches that over the last years have supported compound materials containing rammed earth, the Authors, aware of the need of giving to the relationship of Project and Matter a key role, supported by the characteristics of Architectural Technology, show the results of an experimentation that aims to improve the performance of rammed earth with the contribution of nanotechnologies, developing a 'new material' with a reduced embodied energy and a reduced amount of CO₂ emissions into the atmosphere.

KEYWORDS

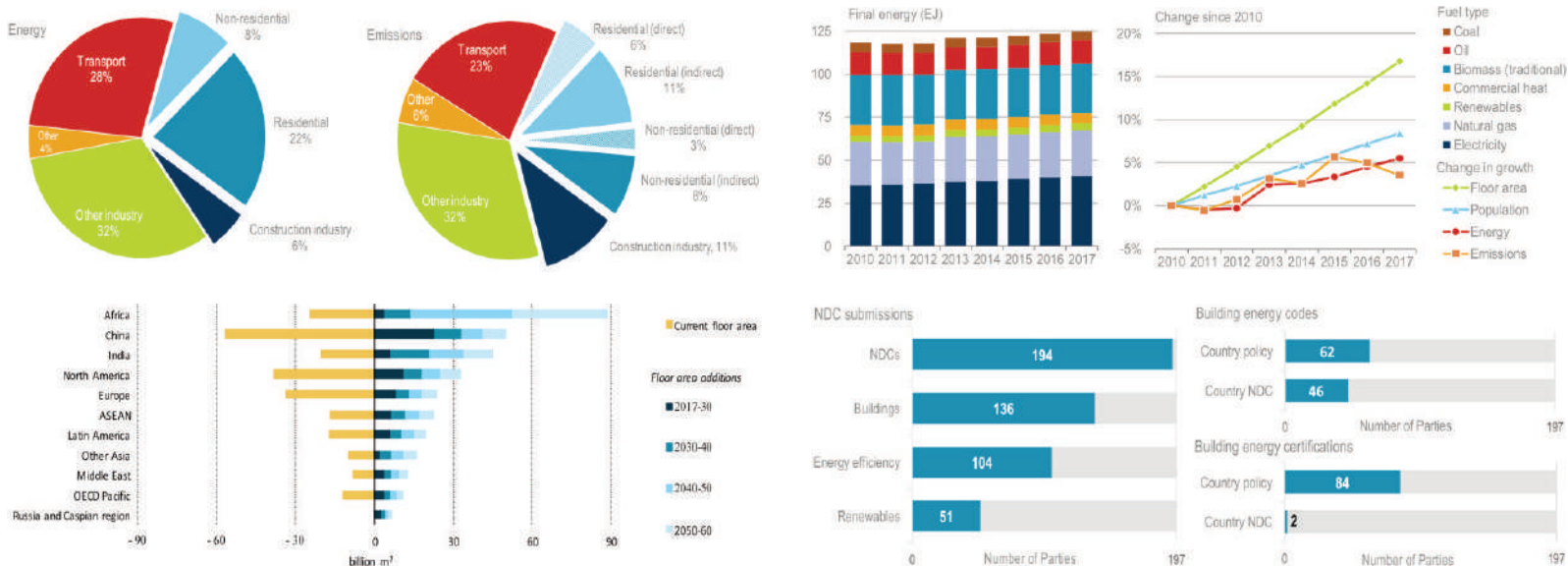
terra cruda, energia incorporata, energia operativa, nanotubi di argilla e halloysite, resistenza a compressione
rammed earth, embodied energy, operational energy, halloysite and clay nanotubes, compressive strength

Energia e Ambiente rappresentano due importanti temi con cui l'Architettura e il mondo delle costruzioni ha iniziato a confrontarsi negli ultimi due decenni, essendo il settore dell'edilizia responsabile del 36% del consumo energetico globale e del 39% delle emissioni di CO₂ (UN Environment, 2018; Grafico 1). Nonostante la crisi economica globale dell'ultimo decennio, il settore delle costruzioni è cresciuto a ritmi senza precedenti e continuerà a farlo nei prossimi 40 anni, realizzando circa 230 miliardi di metri quadrati ogni anno, superficie equivalente a 52 volte la città di Parigi. Questa la premessa dell'autorevole Global Status Report 2017 delle Nazioni Unite (UN Environment, 2017) che prosegue poi con i dati sulla crescita dell'uso di energia negli edifici, passata dai 119 EJ del 2010 ai 125 EJ del 2017 (Grafico 2), con quelli sull'uso di combustibili fossili – rimasto pressoché costante nello stesso periodo a circa 45 EJ – e con quelli sulle emissioni di carbonio, aumentate da 3,1 Giga tonnellate (Gt) di CO₂ del 2010 a circa 3,7 Gt di CO₂ del 2017. E se l'efficienza energetica degli edifici negli ultimi anni è migliorata costantemente a un ritmo medio dell'1,5% annuo, la domanda di energia finale è aumentata di 5 EJ mentre la superficie costruita è cresciuta di circa il 2,3% annuo, vanificando gli sforzi del settore delle costruzioni per contrastare il surriscaldamento globale (IEA, 2017). Nei prossimi 20 anni, si stima che sarà realizzata oltre la metà dei nuovi edifici previsti per il 2060, due terzi dei quali in Asia e in Africa, nello specifico in paesi che non dispongono di norme e codici energetici obbligatori per gli edifici (IEA 2017; Grafico 3).

La Conferenza sui cambiamenti climatici tenutasi a Parigi nel dicembre 2015, conclusasi con la sottoscrizione da parte di 193 paesi del Paris Agreement, ha raccolto 132 contributi (NDC) che menzionano esplicitamente il settore delle costruzioni (Tab. 1): 104 documenti segnalano le opportunità offerte dall'efficienza energetica per raggiungere gli obiettivi di mitigazione, 51 Paesi si dichiarano impegnati a utilizzare fonti rinnovabili per alimentare gli edifici e a sostenere l'adozione di attività energetiche a basse emissioni di carbonio, ma nessuno dei partecipanti menziona tecnologie, certificazioni o norme/codici relativi a standard di prestazione energetica per l'edilizia (European Commission, 2016). Più 'operativo' è invece il documento prodotto dalla Global Alliance for

Buildings and Construction (UN Environment, 2017) il quale, fra le priorità di azione, individua la riduzione della embodied energy e della operational energy che concorrono al computo dell'energia totale impiegata dall'edificio (Barucco et alii, 2016; Gonzalez and Navarro, 2006; Treloar et alii, 2001): se la embodied energy tiene conto dell'intero ciclo di vita del materiale ed è determinata attraverso un'analisi cradle-to-grave – cioè inclusiva dell'energia necessaria per l'estrazione delle materie prime, la lavorazione e il trasporto, nonché dell'energia per la manutenzione periodica e per lo smaltimento finale del manufatto (Dixit et alii, 2010; Verbeeck and Hens, 2010) – la operational energy è riferita alla quantità di energia impiegata nella fase di esercizio degli edifici per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, la produzione di acqua calda sanitaria e l'illuminazione (Koskela, 1992).

Se analizziamo le stime sul consumo globale dei materiali e prendiamo coscienza che il loro utilizzo è aumentato di ben otto volte nell'ultimo secolo fino ad arrivare a 60 miliardi di tonnellate l'anno (Krausmann et alii, 2009), dei quali circa il 40% è utilizzato dall'industria delle costruzioni (Kulatunga et alii, 2006), allora non possiamo non condividere il principio che la questione ambientale debba richiedere al progetto «l'individuazione di soluzioni capaci di ridurre drasticamente il consumo delle risorse e la produzione degli impatti attraverso una rinnovata e ampliata attenzione alle prestazioni della materia, e con l'assunzione dell'orizzonte temporale dell'intero ciclo di vita» (Campioli et alii, 2018, p. 86). Alla luce delle superiori premesse, appare evidente che il rapporto fra Progetto e Materia deve assumere una nuova centralità nella questione ambientale e, con il consolidato supporto della tradizione culturale e scientifica della Tecnologia dell'Architettura (Lucarelli, 2018), deve sviluppare approfondimenti e ricerche sullo studio di materiali naturali, rinnovabili e con ridotte embodied energy e operational energy «[...] senza cedere alla esibizione mediatica dell'innovazione né rinunciare a utilizzare la materia come veicolo – e insieme come contenuto – delle qualità dello spazio e delle architetture» (Antonini et alii, 2017, p. 1). All'interno dello scenario culturale e scientifico di seguito riportato, supportato anche da esempi di architetture contemporanee in terra cruda nelle quali il materiale assume funzione strutturale, il presente contributo



Graph 1 - Global share of buildings and construction final energy and emissions, 2017. The buildings and construction sector is a key actor in the fight against climate change: it accounted for 36% of final energy use and 39% of energy – and process – related emissions in 2017 (credit: UN, 2018; www.iea.org).

Graph 2 - Global buildings sector final energy use by fuel type and change in indicators, 2010-17. Final energy demand in buildings has risen by 5% since 2010, with the impact from the growth in floor area and population outpacing the impact of energy efficiency improvements (credit: UN, 2018; www.iea.org).

Graph 3 - Floor area additions to 2060 by key regions (credit: UN, 2017; www.iea.org).

Tab. 1 - Types of papers (NDC) and buildings policy coverage, 2017-18, presented at the Climate Conference held in Paris (credit: UN, 2018; www.iea.org).

illustra le risultanze di una sperimentazione che ha l'obiettivo di migliorare le prestazioni di resistenza a compressione della terra cruda con l'apporto delle nanotecnologie, sviluppando un 'nuovo materiale' con una ridotta embodied energy e una ridotta quantità di emissioni di CO₂ in atmosfera, capace quindi di limitare la questione ambientale e di promuovere e incentivare la riappropriazione e il riuso di una tecnologia costruttiva tradizionale, sia per il recupero/restauro dell'esistente sia per la realizzazione di nuove costruzioni con dimensioni, usi e condizioni climatiche adeguate o nelle quali si ricercano anche soluzioni materico-plastiche che qualifichino le architetture.

Embodied Energy vs Operational Energy – L'insieme dei dati citati alimenta la preoccupazione per l'impatto ambientale dei materiali, e se da un lato chiarisce il motivo per il quale aggettivi come 'verde', 'bio', 'sostenibile' o 'ecologico' siano diventati molto popolari nel settore delle costruzioni, dall'altro non spiega perché, come fa notare Fernando Pacheco-Torgal (2014), i primi studi sull'analisi LCA del calcestruzzo strutturale Portland – uno dei materiali da costruzione più utilizzati al mondo, la cui produzione supera abbondantemente quella della somma dei laterizi, dell'acciaio e del legno (Flatt et alii, 2012) – risalga soltanto al 2012 (Van den Heede and De Belie, 2012; Habert et alii, 2012). È da rilevare che l'industria delle costruzioni si è attivata per produrre e adottare soluzioni ad alta efficienza energetica e materiali e componenti con elevate prestazioni, promuovendo la realizzazione di costruzioni classificate come nearly Zero Energy Buildings (nZEB) – in accordo con gli indirizzi normativi della Energy Performance Building Directive 31/2010 (European Parliament and Council of the European Union, 2010) recentemente aggiornata con la Direttiva Europea 2018/844 (European Parliament and Council of the European Union, 2018)

– trascurando però il fatto che per la loro stessa produzione si determina spesso un aumento dell'embodied energy, giustificabile solo da una diminuzione significativa dell'energia nella fase di esercizio dell'edificio, ovvero da un bilancio positivo fra embodied energy e operational energy (Hammond, 2007; Sartori and Hestnes, 2007; Ibn-Mohammed et alii, 2013; Jia and Crabtree, 2015; Copiello, 2017).

Diversi studi mettono in dubbio addirittura la possibilità che la produzione di questi materiali ad alte prestazioni possa essere compensata dalla diminuzione dell'energia necessaria alla fase di esercizio, dato che l'embodied energy può rappresentare quasi la metà dell'energia complessiva impiegata nel ciclo di vita di un edificio e in alcuni casi superare addirittura quella operativa (Crawford et alii, 2016). I ricercatori greci Panagiotis Chastas, Theodoros Theodosiou, Dimitrios Bikas e Karolos Kontoleon (2017) hanno esaminato la letteratura scientifica relativa a 90 edifici residenziali, deducendo che, all'interno del ciclo di vita, nei manufatti convenzionali la embodied energy incide per una percentuale variabile tra il 6% e il 20%, in quelli 'passivi' per una percentuale compresa tra l'11% e il 33%, negli edifici 'a basso consumo energetico' oscilla tra il 26% e il 57%, mentre negli nZEB è compresa tra il 74% e il 100%. In ambito italiano, si segnala lo studio LCA su una PassivHaus in Umbria il quale, escludendo dal calcolo il contributo proveniente da fonti rinnovabili, riporta per l'involucro e gli impianti valori superiori che si attestano tra il 48% e il 61% (Proietti et alii, 2013).

In quest'ottica, appare evidente come la ricerca dell'efficienza nella sola fase operativa possa risultare controproducente in termini di consumo energetico totale, perché non garantisce benefici sufficienti in termini di sostenibilità ambientale del manufatto (Langston and Langston, 2008); al contrario, l'uso di materiali e tecniche costruttive

tradizionali e più sostenibili può fornire un importante contributo all'eco-efficienza del settore delle costruzioni (Pacheco-Torgal and Jalali, 2012), potendo determinare una riduzione del 17% dell'energia impiegata nella costruzione di un edificio (Miller, 2001) e abbattere le emissioni di CO₂ del 30% (Crowther, 1999). La selezione di materiali da costruzione sostenibili non dovrebbe concentrarsi solamente sulle prestazioni tecniche, ma soprattutto sull'impatto ambientale e sulla salute/benessere degli utenti (Ip and Miller, 2012; Ding, 2014).

Poiché i materiali da costruzione più comunemente utilizzati – cemento, acciaio e alluminio – sono energivori e contribuiscono in maniera determinante, durante il processo di produzione, alle emissioni di CO₂ in atmosfera (Akbarnezhad and Xiao, 2017), la ricerca sui nuovi materiali 'a bassa energia', sul loro metodo di produzione e sulle possibilità di riciclo è diventata estremamente importante. Uno strumento fondamentale per valutare gli impatti ambientali dei materiali è la Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD – Environmental Product Declaration) o Etichetta ambientale di tipo III (Minkov et alii, 2015), la quale fornisce dati ambientali quantificati utilizzando parametri predeterminati e, se del caso, ulteriori informazioni ambientali in base alla Norma ISO 14025 (2006). L'EPD è un documento tecnico, verificato da un Ente di certificazione, che accompagna la commercializzazione del prodotto e che riporta informazioni quantitative basate sulla metodologia LCA, così come definita dalla Norma ISO 14040 (2006). Il Comitato CEN TC350 – Sostenibilità delle opere di costruzione (De Wolf et alii, 2017) ha definito le Product Category Rules (PCR) per le EPD dei materiali da costruzione all'interno della Norma EN 15804:2012+A1:2013. Le PCR descrivono quali fasi del ciclo di vita – Product stage, Construction stage, Use stage, End of life stage, più un modulo opzionale

Reuse-recovery (D) – devono essere considerate nella dichiarazione ambientale di prodotto e quali processi sono da includere.

Nello schema di Tabella 2 sono indicate le fasi obbligatorie e quelle opzionali, in base al limite del sistema preso in considerazione: l’analisi ‘cradle to gate’ valuta solo la fase del Product stage (A1-A3), che pertanto è obbligatoria; nell’analisi ‘cradle to gate with options’, la fase del Product stage (A1-A3) è obbligatoria mentre tutte le altre fasi sono opzionali; nell’analisi ‘cradle to grave’ sono obbligatorie tutte le fasi tranne la D) che è opzionale. È da rilevare comunque che se da un lato gli standard TC 350, attraverso la metodologia armonizzata attualmente proposta, forniscono un importante strumento per valutare le prestazioni ambientali e i costi del ciclo di vita degli edifici, dall’altro presentano diversi limiti con cui la ricerca e le politiche ambientali dei diversi Paesi dovranno confrontarsi nel prossimo futuro; infatti, natura volontaria dello strumento, accuratezza delle misurazioni e discrezionalità dei dati di alcune fasi, non consentono di fornire il reale consumo di energia dei materiali e dei componenti edilizi durante il loro intero ciclo di vita e, di conseguenza, non permettono di valutarne in modo univoco il relativo bilancio energetico generale.

Terra cruda e sostenibilità – Fra i materiali naturali che certamente possono essere impiegati in edilizia fornendo un valido contributo alla sostenibilità ambientale delle costruzioni, vi è la terra cruda, alternativa ecologica ed economica rispetto a materiali e processi produttivi decisamente più energivori: i mattoni in terra non richiedono una grande quantità di energia poiché, a differenza dei comuni laterizi, non hanno bisogno della fase di cottura, durante la quale viene emessa una considerevole quantità di CO₂. Di contro questo materiale non presenta un’elevata resistenza meccanica e ciò non consente di utilizzarlo in maniera indiscriminata. La terra cruda ha ricevuto comunque negli ultimi anni una grande attenzione da parte della comunità scientifica, come testimonia l’incremento delle ricerche pubblicate, di cui oltre un centinaio su riviste Scopus (Pacheco-Torgal and Jalali, 2012). Se è vero che tale quantità rappresenta solo una piccola parte rispetto agli articoli pubblicati sul cemento Portland, è anche vero che essa è aumentata di almeno dieci volte rispetto agli articoli sulla terra cruda pubblicati negli anni ‘90.

Diversi studiosi hanno condotto ricerche che confrontano le emissioni di anidride carbonica di edifici realizzati in terra cruda con edifici realizzati con murature tradizionali, concludendo che l’energia incorporata utilizzata negli edifici in terra cruda è notevolmente inferiore rispetto a quella utilizzata per quelli in muratura tradizionale, così come sensibilmente più ridotte sono le relative emissioni di CO₂ (Morton et alii, 2005; Shukla et alii 2008). I dati forniti dall’Inventory of Carbon and Energy (Hammond and Jones, 2011), un database sui materiali da costruzione che riporta i relativi dati sulla embodied energy (MJ/kg) e quelli sull’emissione di CO₂ (kgCO₂/kg), ci dimostrano come la terra pressata abbia valori di 0,45 MJ/kg e di 0,023 kgCO₂/kg notevolmente più bassi sia rispetto al cemento Portland (5,50 MJ/kg e 0,93 kgCO₂/kg) sia alla calce (5,3 MJ/kg e 0,76 kgCO₂/kg); i suddetti valori aumentano quando la terra pressata è stabilizzata con cemento nella percentua-

le del 5% (0,68 MJ/kg e 0,060 kgCO₂/kg) o all’8% (0,83 MJ/kg e 0,082 kgCO₂/kg).

Architettura contemporanea in Terra – La terra è un materiale da costruzione con una tradizione millenaria – lo dimostrano i resti delle fortificazioni greche di Capo Soprano a Gela in Sicilia del IV sec. a.C. (Fig. 1) o le città mediorientali interamente realizzate in terra, come Shibam nello Yemen (XVI sec.) nota anche come la Manhattan del Deserto (Fig. 2) – la quale, in virtù della sua versatilità, è in grado di porsi perfettamente in equilibrio con l’ambiente: la terra si presta a realizzazioni accessibili a qualsiasi organizzazione produttiva, dalla più semplice alla più complessa; inoltre è una risorsa facilmente reperibile nella gran parte dei contesti geografici e la varietà delle prestazioni ottenibili dalle diverse tecniche esecutive consente di produrre manufatti adatti a perseguire il risparmio energetico e il comfort in differenti contesti climatici (Sposito, 2013). Tra le caratteristiche della terra cruda si annoverano: l’elevata inerzia termica (per le sue proprietà igroscopiche); la capacità di mantenere costante, negli ambienti interni, un grado di umidità dell’aria intorno al 50%, evitando così livelli di umidità superiore al 70% responsabili della comparsa di muffe (Arundel et alii, 1986) o del proliferare di acari e malattie asmatiche (Howieson, 2005); le diverse proprietà di isolamento acustico (legate alla ‘elasticità’ del materiale), di abbattimento delle onde elettromagnetiche superiore a tutti gli altri materiali da costruzione (il 99% con spessori di soli 15 cm di terra), di purificazione dell’aria (grazie all’elevata porosità del materiale che assorbe il vapore acqueo) e di eliminazione dei fenomeni di condensa, soprattutto di quella interstiziale. Punti di debolezza sono l’elevata manutenibilità, l’effetto dell’acqua e la modesta resistenza meccanica.

Tra i prodotti più diffusi riconducibili alla terra cruda vi è sicuramente l’adobe, un mattone di terra cruda formato a mano, con stampo e senza compressione, e lasciato a seccare naturalmente; tra i più impiegati, soprattutto in epoca recente, vanno ricordati il blocco compresso, un mattone realizzato con l’ausilio di presse meccaniche per aumentare le caratteristiche di compressione, e il

blocco estruso, la cui esecuzione è simile a quella dei laterizi. Un’altra tecnica costruttiva molto diffusa è il pisé, che consiste nella formatura e compressione della terra in apposite casseforme: il materiale viene inserito in strati di 5-12 cm e battuto fino ad arrivare a strati di circa 80 cm. Le peculiarità della terra cruda se da un lato si prestano alla realizzazione di nuovi manufatti altamente sostenibili, grazie alle potenzialità plastiche e iconografiche del materiale, dall’altro risultano estremamente utili per interventi di integrazioni in costruzioni antiche in terra, eliminando quelle occasioni di incompatibilità – sia fisica sia identitaria – determinate dai materiali moderni. Per queste ragioni, alcuni progettisti contemporanei illuminati si sono cimentati nel riscoprire le caratteristiche di sostenibilità prediligendo la terra ad altri materiali caratterizzati da processi lineari di produzione e più energivori.

La terra cruda è stata impiegata in svariati tipi edilizi come musei, scuole, alberghi, ville, soprattutto in Paesi come l’Australia, il Canada, gli Stati Uniti o la Cina, dove esistono già da tempo regolamenti e norme per questo materiale da costruzione. Il centro culturale NK’MIP (Fig. 3) è stato realizzato in Canada, nella Columbia Britannica, in un’area di proprietà degli indiani Osoyoos, caratterizzata da un habitat unico nel panorama canadese. Al progetto iniziale, di Hotson Bakker Boniface Haden Architects + Urbanistes (HBBH), costituito da un edificio in cemento, è stato aggiunto un lungo muro in pisé – realizzato con terra locale, coloranti e una percentuale di cemento di poco superiore al 6% – per meglio integrarsi con l’ambiente circostante e soddisfare le esigenze della comunità indiana che stentava a riconoscersi nell’edificio in cemento. In contesti geografici caratterizzati da aree desertiche l’integrazione con il paesaggio circostante può essere realizzata soltanto con l’utilizzo di materiali naturali come la terra; in tal senso vanno lette la Dirt House del 1997 realizzata a Scottsdale, in Arizona, edificio residenziale a un unico livello, opera dell’architetto Neil Jones (Rael, 2008), la Palmer-Rose House a Tucson, in Arizona, che l’architetto Rick Joy ha progettato nel 2001 con muri in pisé – la stessa tecnica impiegata per l’ingresso al McDowell Sonoran Preserve – e

BUILDING LIFE CYCLE INFORMATION																Supplementary information beyond the building life cycle	
A1-3			A4-5		B1-7							C1-4				D	
Product stage			Construction process stage		Use stage							End of life stage				Benefit and loads beyond the system boundary	
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport	Construction	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse Recovery Recycling potential	
Scenario			Scenario							Scenario							
Cradle to gate	M	M	M														
Cradle to gate with options	M	M	M	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Cradle to grave	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	O

M = Mandatory O = Inclusion Optional

Tab. 2 - Information Forms for building products, adapted from EN 15804.

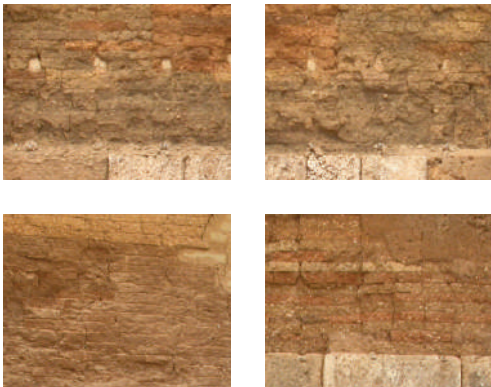


Fig. 1 - Rammed earth bricks of Capo Soprano (Gela, Italy) defensive walls of IV B.C. Century (credit: Scalisi, 2010).



Fig. 2 - The City of Shibam in Yemen of the 16th Century (credit: www.scienze-ricerche.it/?p=2662).



Fig. 3 - The NK'MIP Cultural Centre in Canada (credit: www.nkmipdesert.com).



Fig. 4, 5 - The TarraWarra Museum of Art in Victoria, Australia (credits: www.museumnetwork.sothebys.com/en/museums/tarrawarra-museum-of-art).

The TarraWarra Museum of Art (Fig. 4, 5) a Victoria, in Australia, interamente realizzato in terra nel 2004 su progetto dell'architetto Alan Powell. Più recente è il SanBaoPeng Art Museum (2017) a Jingdezheng in Cina, realizzato su progetto di DL Atelier, che impiega la terra cruda locale per perimetrare, con pareti lunghe 150 metri e alte 4 metri, lo spazio espositivo, richiamando con l'uso dell'argilla il materiale con cui sono realizzate le ceramiche esposte. I due setti longitudinali delimitano gli ambienti espositivi insieme a grandi vetrate trasversali e consentono alla nuova architettura d'integrarsi con discrezione in un contesto spiccatamente naturalistico (Fig. 6).

In Europa, Martin Rauch è considerato uno dei pionieri delle moderne tecniche per l'applicazione di tradizionali metodi di costruzione in terra. L'architetto austriaco ha realizzato un volume in argilla nella Chiesa della Conciliazione a Berlino (Fig. 7, 8), inaugurando nel 2000 la prima chiesa tedesca in argilla compressa (da 30 a 8 cm) con pareti spesse 60 centimetri e alte 7 metri. L'edificio sorge sulle rovine della vecchia Chiesa eretta nel 1894, caduta in rovina negli anni successivi alla costruzione del Muro di Berlino. Il nuovo progetto è composto da due corpi edilizi

ovali, collocati uno dentro l'altro ma con gli assi principali ruotati ortogonalmente: l'ovale esterno è realizzato in lamelle di legno mentre quello interno è in argilla compressa, mista a frammenti di pietra e di vetro provenienti dalle macerie della chiesa precedente. La sperimentazione in terra cruda iniziata da Martin Rauch nel 1994 con la realizzazione del proprio Atelier a Schlins, in Austria (Fig. 9, 10) – diventato un edificio di riferimento per gli operatori del settore – è proseguita con diversi fabbricati residenziali. L'Atelier, progettato con l'architetto Roger Boltshauser, è un edificio di tre livelli, realizzato in terra compressa stratificata con sottili fila di mattoni disposti a intervalli regolari, visibili nella facciata. Le pareti, i pavimenti e gli intonaci sono realizzati completamente con la terra dello sbancamento, risultato della volontà di costruire una casa esclusivamente con materiali sostenibili. La casa in terra ha una struttura monolitica che si presenta come un blocco scultoreo, una natura astratta e artificiale spinta verso l'alto dalla terra sottostante. Infine, è da citare il nuovo Ricola Kräuterzentrum a Laufen in Svizzera, realizzato su progetto di Herzog & de Meuron con la Lehm Ton Erde Baukunst GmbH (di Martin Rauch), manifesto bio/eco della nota

azienda produttrice di erbe aromatiche, attenta da sempre alla sostenibilità ambientale: l'involucro – realizzato con un composito a base di terra locale, inerti di tufo vulcanico provenienti da cave presenti nel raggio di 8 Km e calce – consente alla struttura di integrarsi con il paesaggio circostante e al contempo di mitigare il consumo energetico operativo, contribuendo a stabilizzare i livelli di temperatura e umidità necessari alla lavorazione delle erbe (Fig. 11).

La stabilizzazione delle terre, fra ricerca e sperimentazione – Le scarse caratteristiche meccaniche della terra cruda richiedono, ai fini di un suo impiego nei manufatti, che la stessa sia sottoposta a un processo di stabilizzazione che modifichi le proprietà fisico-chimiche e meccaniche del sistema terra-acqua affinché, attraverso l'aggiunta di altri materiali, se ne possano migliorare resistenza e/o altre proprietà per un impiego duraturo e compatibile per particolari applicazioni. La stabilizzazione della terra è un processo che ha antiche origini nella tradizione costruttiva in terra cruda, con aggiunte di fibre vegetali o animali (paglia, crine di cavallo), di sostanze collanti (caseina, sangue, sterco animale, albume d'uovo), di cementi, di calce o bi-

tumi (Danso et alii, 2015) e che si realizza con procedure di tipo meccanico, fisico e chimico (Houben and Guillaud, 1994): la prima prevede il compattamento della terra, azione che ne modifica la densità, la resistenza meccanica, la comprimibilità, la permeabilità e la porosità; la seconda è realizzata con miscele di granulometrie differenti e controllate per mezzo di specifici setacci; la terza, discussa nel presente contributo, consiste nell'aggiunta di altri materiali o prodotti chimici. La letteratura scientifica restituisce un quadro abbastanza esaustivo su quelle ricerche e sperimentazioni che, negli ultimi quindici anni, hanno previsto l'impiego di vari tipi di stabilizzanti (artificiali, naturali e misti) per il miglioramento delle prestazioni meccaniche della terra cruda.

Tra gli stabilizzanti artificiali, il cemento è sicuramente il materiale più utilizzato soprattutto per la correlazione proporzionale fra resistenza a compressione e suo dosaggio nell'impasto (Morel et alii, 2007): diverse in tal senso sono le sperimentazioni che hanno prodotto mattoni in terra cruda con resistenza alla compressione di 9,4 MPa (Walker and Stace, 1997), di 6,5 MPa (Bahar et alii, 2004), di 6,4 MPa (Millogo and Morel, 2012). Altro stabilizzante testato è la calce, con la quale si sono ottenuti mattoni in terra cruda dalla resistenza a compressione compresa tra 3,03 MPa (Burroughs, 2006) e 3,6 MPa (Millogo et alii, 2008). Se le citate sperimentazioni dimostrano che i due stabilizzanti artificiali migliorano sensibilmente le prestazioni a compressione della terra cruda (il cui impatto ambientale è irrilevante), è altrettanto condiviso che cemento e calce sono materiali tutt'altro che 'sostenibili' ed 'ecologici', dato che sono caratterizzati da un'elevata embodied energy. Questa presa di coscienza ha così guidato nuove sperimentazioni con l'obiettivo di determinare le percentuali massime di cemento e di calce utili a migliorare le prestazioni del nuovo impasto mitigandone al contempo l'impatto ambientale (Ciancio et alii, 2014). È stato quindi calcolato che la percentuale massima di cemento e di calce da utilizzare – con riferimento all'impatto energetico del calcestruzzo aerato autoclavato (AAC) che è uno dei materiali con il minor impatto ambientale fra quelli a base di cemento – è pari all'8% per il primo e al 7% per la seconda (Maskell et alii, 2014a). Invero, anche impiegando percentuali minori si possono ottenere prestazioni soddisfacenti: l'aggiunta del 5% di cemento determina infatti una resistenza alla compressione pari a 7,4 MPa, valore tutt'altro che irrisorio se confrontato con il 2,9 MPa di resistenza minima alla compressione in condizioni a secco (Maskell et alii, 2014).

Altri studi si sono invece concentrati sulla stabilizzazione della terra cruda con l'impiego di cemento o calce insieme a materiali di origine natu-

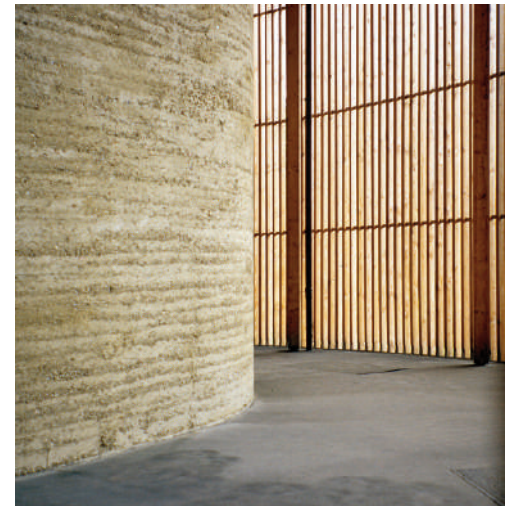


Fig. 6 - The SanBaoPeng Art Museum in Jingdezhen, China, designed by DL Atelier, 2017 (credit: www.archdaily.com).

Fig. 7, 8 - The Chapel of Reconciliation in Berlin by Martin Rauch (credits: Minke, 2000).

Fig. 9, 10 - The Atelier in Schlins, Austria, by Martin Rauch and Roger Boltshauser (credits: netzwerk.lehm.at/lehmbau/haus-rauch/).

Fig. 11 - The Ricola Kräuterzentrum in Laufen, Switzerland, designed by Herzog & de Meuron with Lehm Ton Erde Baukunst GmbH, 2014 (credit: Sun Haiting).

	[%]
SiO ₂	48.88
Na ₂ O	1.33
K ₂ O	0.56
MgO	5.05
Fe ₂ O ₃	8.08
Al ₂ O ₃	11.8
MnO ₂	0.05
TiO ₂	0.05
Organic matter	2.03
Cl	0.013
F	0.001

Tab. 3 - The chemical composition of the earth used in the experimentation.

	[%]
SiO ₂	92
Al ₂ O ₃	4
Fe ₂ O ₃	0.04
TiO ₂	0.01
CaO	0.3
MgO	0.02
K ₂ O	3.2
Na ₂ O	0.2

Tab. 4 - The chemical composition of the sand used in the experimentation.

mm	[%]
>1.00<1.50	3
1.00 - 0.80	8
0.80 - 0.60	37
0.60 - 0.40	37
0.40 - 0.30	8
<0.30	5

Tab. 5 - Particle size of sand used in the experimentation.

Dimensions	30-70 nm diameter × 1-3 μm length
Pore size	1.26-1.34 mL/g pore volume
Surface area	64 m ² /g
Capacity	8.0 meq/g cation exchange capacity
Density	2.53 (true specific gravity)
Formula	H ₄ Al ₂ O ₉ Si ₂ · 2 H ₂ O
Molecular Weight	294.19 g/mol
Form	nanopowder
Color	75-96 Hunter Brightness
Refractive index	n _{20/D} 1.54

Tab. 6 - Characteristics of Halloysite Nanoclay.

rale come lo Sugarcane Bagasse Ash (SBA), il residuo fibroso della canna da zucchero prodotto dopo l'estrazione del succo. SBA e cemento Portland ordinario, rispettivamente nelle percentuali



Fig. 12-14 - The materials used in the experimentation: Earth; Sand; Halloysite (credits: Scalisi and Sposito, 2017).

dell'8 e del 10 per cento, riescono a fornire una resistenza a compressione pari a 5,85 MPa (James et alii, 2016). Altre sperimentazioni con lo Sugarcane Bagasse Ash come stabilizzante sono quelle portate avanti da Sofia Lima (et alii, 2012), da Richard Onchiri (et alii, 2014), da Ramadhan Salim (et alii, 2014), da Anil Pratap Singh e Piyush Kumar (2015), e da Pakdee Khobklang (et alii, 2008). Un'altra interessante ricerca riguarda l'impiego di cemento e di calce con il metacaolino, legante pozzolanico 'naturale' e 'sostenibile' che si ottiene calcinando le argille caoliniche a una temperatura di circa 650°: i mattoni realizzati con l'aggiunta del 5% di calce e del 5% di metacaolino hanno raggiunto una resistenza a compressione pari a 6,96 MPa mentre campioni con le stesse percentuali di cemento e metacaolino forniscono valori di 3,73 MPa (Maskell et alii, 2015, 2016).

Infine, tra i diversi studi che hanno impiegato i soli stabilizzanti naturali, sollecitati da una ormai improcrastinabile sensibilità verso l'ecosistema e richiamando una pratica già consolidata sin dall'antichità, è da rilevare come molti di essi abbiano sperimentato additivi alternativi, rifiuti o sottoprodotti provenienti da vari settori industriali (Oti et alii, 2009; Tingle et alii, 2007). Esempi di rilievo sono le diverse stabilizzazioni con fibre di Hibiscus cannabinus – resistenza a compressione pari a 2,9 MPa (Millogo et alii, 2014), con scarti di lavorazione del tè – resistenza a compressione di 7,6 MPa (Demir, 2006), con scarti dei frutti delle palme da olio – resistenza a compressione di 10,65 MPa (Ismail and Yaacob, 2011), con bucce di manioca – resistenza a compressione di 2,15 MPa (Villamizar et alii, 2012). È inoltre da segnalare uno studio che ha sperimentato l'impiego di alginato (un polimero naturale estratto dalle alghe marine) e la lana di pecora per stabilizzare i terreni e per produrre un materiale da costruzione composto, sostenibile, non tossico e di provenienza locale (Galán-Marín et alii, 2010). I test hanno dimostrato che se l'aggiunta di alginato nell'impasto aumenta la resistenza a compressione a 3,77 MPa e quella della lana aumenta la resistenza a compressione a 3,05 MPa, il loro uso congiunto migliora in modo significativo la resistenza fino a 4,44 MPa, valore simile a quello ottenuto con il 10% di cemento Portland e maggiore di quello ottenuto con le più alte percentuali di calce (3,6 MPa).

La nuova sperimentazione su terra con nanotubi di argilla – All'interno del riportato scientifico-sperimentale, il presente contributo illustra le attività di sperimentazione su terra cruda e nanotecnologie eseguite dagli Autori all'interno del Dipartimento di Architettura della Scuola Politecnica di Palermo nel biennio 2017-2018. La ricerca

sperimentale è stata condotta con l'obiettivo di migliorare le prestazioni dei mattoni in terra cruda tramite l'apporto delle nanotecnologie, realizzando un 'nuovo materiale' con ridotta energia incorporata e modeste quantità di emissioni di anidride carbonica in atmosfera. Nello specifico, le prestazioni analizzate sono quelle legate alla resistenza a compressione che ne ampliano il settore di impiego come materiale in edilizia.

Materiali, metodologia e fasi operative – La terra cruda è un materiale composito naturale che deriva dalla combinazione di più materiali (argilla, sabbia, ecc.) le cui caratteristiche possono essere migliorate – attraverso un processo di stabilizzazione – con l'aggiunta di altri materiali. Nel caso specifico, all'impasto costituito da terra (Fig. 12), sabbia (Fig. 13) e acqua si è scelto di aggiungere l'Halloysite (Fig. 14), un nanotubo di argilla, soluzione validata dalla natura bio-based che il materiale nanostrutturato garantisce e dalle potenzialità prestazionali che in generale la nanotecnologia fornisce al settore edilizio (Scalisi, 2010).

Per i materiali presenti nell'impasto, si precisa che: a) la terra e la sabbia sono stati forniti dalla ditta Guglielmino di Misterbianco (CT) e provengono dalla cava denominata Roccasiele-Guglielmino Group, ubicata nel Comune di Motta S. Anastasia (CT); b) la composizione chimica della terra è riportata nella Tabella 3; c) la composizione chimica e la granulometria della sabbia sono indicate rispettivamente nelle Tabelle 4 e 5; d) l'Halloysite Nanoclay utilizzata per la presente sperimentazione, le cui caratteristiche sono dichiarate nella Tabella 6, è prodotta dalla Applied Minerals Inc. ed è disponibile presso la Sigma-Aldrich. L'Halloysite è un nanotubo di argilla con un diametro generalmente inferiore a 100 nanometri e con lunghezze che variano da circa 500 nanometri a oltre 1,2 micron; essa è chimicamente simile alla caolinite (Yuan et alii, 2015) e presenta una struttura tubolare prevalentemente cava a doppio strato di alluminio, silicio, idrogeno e ossigeno. Materiale poco costoso, facilmente reperibile e non tossico con un'elevata resistenza meccanica (Farzadina et alii, 2013), l'Halloysite – insieme ai nanocompositi e alle polveri nanometriche – rientra in quel settore della 'nanotecnologia verde' che mira a sviluppare prodotti sicuri e meno nocivi per l'ambiente (Kamble et alii, 2012; Nasrollahzadeh et alii, 2019). I nanotubi di Halloysite trovano numerose applicazioni commerciali come additivi in polimeri e plastica, componenti elettronici, veicoli per la somministrazione di farmaci, cosmetici e prodotti per la casa (Lvov et alii, 2008; Zhang et alii, 2016; Lazzara et alii, 2018), essendo materiali inorganici di rinforzo. In generale, l'aggiunta

del 5% di Halloysite aumenta sinergicamente la forza del polimero del 30-70% e migliora l'adesività composita (Lvov and Elshad, 2013).

I diversi materiali (47% di terra, 30% di sabbia e 2% di Halloysite) sono stati miscelati a secco per poi essere impastati con l'aggiunta di acqua nella misura del 21% del peso (Fig. 15). Per la realizzazione dei campioni, si è seguita la procedura consolidata impiegata per l'adobe: il mattone di terra cruda è stato formato a mano, entro stampi in acciaio delle dimensioni di 50x50x50 mm, senza compressione meccanica ma riempiendo completamente le cavità e rimuovendo il materiale in eccesso. Ruotata la forma ed estratto il blocco, gli elementi ottenuti sono stati posizionati su di un ripiano in luogo asciutto e ventilato per poter permettere l'essiccazione (Figg. 16-18); dopo un paio di giorni si presentavano sufficientemente solidi per poter essere girati e continuare così l'essiccamento, la cui durata è stata di 28 giorni. Nella preparazione dei provini, si sono rese necessarie due prove, prima di quella definitiva, per determinare la percentuale di Halloysite da inserire nell'impasto: la prima con una percentuale di Halloysite del 5%, la seconda con una percentuale del 3%. Entrambi gli impasti sono risultati eccessivamente fluidi, indipendente dalla quantità di acqua utilizzata, richiedendo una diminuzione della percentuale di Halloysite fino ad arrivare al 2% utilizzato per la produzione dei provini finali. I provini così ottenuti sono stati sottoposti alle prove di compressione (Figg. 19, 20). In assenza di normative specifiche sui prodotti in terra cruda, si è utilizzata la Norma UNI EN 772-1:2011 'Metodi di prova per elementi per muratura - Parte 1: Determinazione della resistenza a compressione', utilizzata anche in altre sperimentazioni su questo materiale (Maskell et alii, 2014); nel nostro caso tale Norma è stata presa come riferimento delle metodologie di prova con modifiche che riguardano il 'condizionamento dei provini per le prove di compressione'.

Preliminarmente all'esecuzione delle prove di resistenza a compressione, si è proceduto alla preparazione dei provini mediante le operazioni di taglio e di rettifica e al condizionamento degli stessi alla temperatura di 20 ± 2 °C e all'umidità relativa di $65 \pm 5\%$, fino a massa costante. Inoltre è stato determinato il peso di volume di alcuni frammenti di provino (n. 2 determinazioni per serie di campioni) mediante il metodo della pesata idrostatica (Norma di riferimento C.N.R. - B.U. n. 40), non essendo attendibile, vista l'irregolarità dei provini, il calcolo con metodo geometrico (Tab. 7).



Risultati, discussione e sviluppi futuri – I provini sottoposti alla prova di compressione sono n. 6, contrassegnati con le sigle C1, C2, C3, C4, C5 e C6 (Figg. 21-26). I risultati della prova sui singoli campioni sono riportati nella Tabella 8 che mostra una resistenza media a compressione 'a secco' pari a 3,4 MPa. Si tratta di un risultato apprezzabile, considerando che in questo nuovo prodotto non sono stati utilizzati stabilizzanti come cemento o calce e che la resistenza minima alla compressione in condizioni a secco viene ritenuta pari a 2,9 MPa (Maskell et alii, 2014). Il valore ottenuto è più basso di quello del mattone realizzato con alginato e lana di pecora che fornisce una resistenza a compressione di 4,4 MPa (Galán-Marín et alii, 2010) o del mattone realizzato con il 5% di cemento e il 5% di metacaolino la cui resistenza a compressione è pari a 3,73 MPa (Maskell et alii, 2015, 2016). Ma occorre fare in merito delle considerazioni: a) in entrambi i casi si tratta di impasti che utilizzano processi di formazione più energivori come la compattazione meccanica (nel caso dell'impasto con alginato e lana) o l'estrusione (nel caso dell'impasto con metacaolino e cemento); b) i mattoni realizzati con compattazione meccanica e quelli estrusi forniscono, anche senza la presenza di stabilizzanti, una resistenza maggiore rispetto all'adobe; c) nel secondo caso, la resistenza a compressione è sì più alta ma di poco – 3,4 contro 3,7 MPa – pur trattandosi di un mattone estruso con la presenza nell'impasto del 5% di cemento.

La ricerca condotta presenta quindi interessanti margini di miglioramento, innanzitutto con l'introduzione della compressione meccanica, in considerazione del fatto che pensando all'impiego della terra cruda nell'attualità appare poco realisti-

ca una formazione del mattone a mano: l'introduzione di mezzi meccanici nella produzione, sebbene ne incrementi l'embodied energy (che rimane comunque inferiore rispetto a quella di altri materiali), migliora sia le prestazioni meccaniche sia il ciclo produttivo della terra cruda. Inoltre, data la fragilità del materiale in condizioni di umidità, sarà necessario verificare che la resistenza a compressione in condizioni di 'umido' non sia inferiore a 1 MPa, valore risultante dalle prove condotte da Maskell (et alii, 2014). Infine, poiché l'Halloysite utilizzata nella presente sperimentazione è un prodotto già in commercio, data la forma tubolare del materiale, possibili sviluppi della ricerca – in un'ottica multidisciplinare – potranno riguardare interventi volti a caricare i nanotubi di argilla in laboratorio, ad esempio con biopolimeri, e quindi utilizzare nell'impasto i nanotubi modificati.

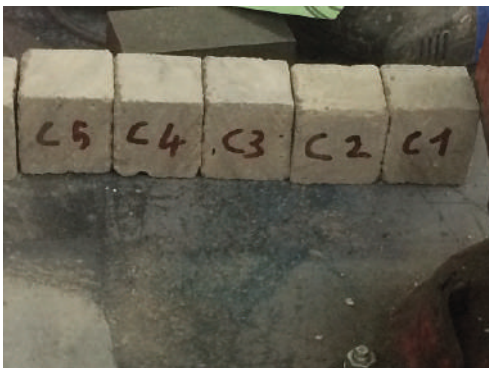
Conclusioni – Se la questione ambientale è una priorità ineludibile, allora è di tutta evidenza che il rapporto fra progetto e materia deve riconquistare, pur nella complessità del quadro essenziale che la contemporaneità richiede, una nuova centralità, soprattutto in considerazione agli aspetti ambientali nel ciclo di vita. In tal senso è determinante la figura dell'architetto-tecnologo come operatore qualificato che, riappropriandosi di un sapere 'materico' spesso dimenticato, sia capace di governare il progetto con la consapevolezza della dimensione materiale e produttiva dei processi, presidiando in maniera intelligente e 'laica' le tecnologie e svolgendo in modo incisivo il proprio ruolo culturale e professionale: «[...] un progettista in grado di dialogare con gli specialisti (senza essere tale), di tradurre opzioni figurative, configurazioni spaziali ed esigenze in puntuali specifiche tecniche e in dispositivi coerenti, efficienti e sostenibili, senza perdere uno sguardo d'insieme sul progetto di architettura come sintesi colta di saperi eclettici e complementari» (Antonini et alii, 2018, p. 17).

Nell'ultimo ventennio, le dinamiche industriali e commerciali dell'innovazione tecnologica spinte dalle esigenze imposte dalla stringente questione ambientale hanno condizionato materiali, tecniche e tecnologie costruttive scardinando prassi consolidate che, a fronte di ridotte emissioni, contenimento dei consumi energetici operativi e prodotti di impronta ecologica, ci hanno restituito manufatti spesso privi di identità «[...] con un valore che è più segnaletico che stilistico, [...] 'edifici-simbolo' con due essenziali componenti: quella di essere 'segnali' nella confusione urbanistica che li circonda, ma



Fig. 15 - Mixture of earth, sand, Halloysite and water (credit: Scalisi and Sposito, 2017).

Figg. 16-18 - Samples during drying stage (credits: Scalisi and Sposito, 2017).



Figg. 19, 20 - The samples ready for compressive strength tests (credits: Scalisi and Sposito, 2017).

anche quella di sostituire i ‘modesti’ monumenti del passato» (Dorfles, 2007, p. 8). Le ricerche attivate in questi anni sulla terra cruda rispondono in tal senso alla duplice richiesta da un lato di valutare e progettare materiali bio-based non solo da un punto di vista delle prestazioni tecniche ma soprattutto rispetto alle prestazioni ambientali, ottimizzando risorse e processi di produzione al fine di ridurre le fasi più onerose dal punto di vista energetico, dall’altro di far recuperare all’architettura un carattere identitario attraverso coerenza, riconoscibilità del linguaggio e relazione con i luoghi.

La resistenza culturale verso questo materiale è parte di quei 12 ostacoli all’adozione di forme di costruzione sostenibili che Amr Sourani e Muhammad Sohail (2011) hanno sapientemente individuato. Non sappiamo quanto la sperimentazione illustrata possa contribuire a far superare i pregiudizi su questo materiale certamente povero ma sostenibile e dalle prestazioni potenziabili con l’ausilio delle ‘nanotecnologie verdi’, ma siamo certi che se è necessaria, oggi più che mai, un’inversione radicale di rotta nel comportamento degli operatori del settore edilizio (Francese, 2014), non altrettanto rimandabili sono approfondimenti su strumenti normativi, incentivi e strumenti di finanziamento, formazione e sviluppo di capacità, cambiamenti nei comportamenti e nelle pratiche sociali degli utenti per le quali il dialogo di facilitazione promosso dalle Nazioni Unite con la Talanoa Dialogue Platform e la United Nations Framework Convention on Climate Change nel 2018 – e la relativa revisione collettiva formale prevista nel 2023 – possono costituire un buon volano, colmando il divario fra le ambizioni climatiche e le attuali politiche nel settore delle costruzioni.

ENGLISH

Energy and Environment are two major subjects to which architecture and building started to be confronted with over the last twenty years, as the building sector is responsible for 36% of global energy consumption and 39% of CO₂ emissions (UN Environment, 2018; Graph 1). Despite the global economic crisis of the last decade, the building industry area has been growing at an unprecedented rate and will keep growing in the next 40 years, building around 230 billion square metres every year; 52 times the area of the city of Paris. This is the premise of the important Global Status Report 2017 of the United Nations (UN Environment, 2017) which then continues with data on the growth of energy use in buildings, which rose from 119 EJ in 2010 to 125 EJ in 2017 (Graph 2). Then it deals with the data on fossil fuels – that has stayed stable in the same time span at around 45 EJ – and with those on carbon emissions, increased from 3.1 Gigatonnes (Gt) of CO₂ in 2010 to around 3.7 Gt of CO₂ in 2017. And if the energy efficiency of buildings in recent years has steadily improved at an average rate of 1.5% per year, the final energy demand has increased by 5 EJ while the built area has grown of about 2.3% per year, neutralizing the efforts of the building industry to contrast global warming (IEA, 2017). In the next twenty years, it is estimated that over half of the new buildings planned for 2060 will be built, two thirds of them in Asia and Africa, specifically in Countries that do not have mandatory energy codes and building regulations (IEA 2017; Graph 3).

The Climate Change Conference held in Paris in December 2015 resulted in the Paris Agreement, signed by the 193 countries. On the occasion were collected 132 papers (NDC) explicitly mentioning the building industry (Tab. 1). 104 documents report the opportunities given by the energy efficiency to achieve mitigation goals; 51 countries declare to be committed to using renewable sources to power buildings and to support the implementation of low-carbon emissions activities. None of the participants mentions technologies, certifications or standards/codes on energy performance for buildings (European Commission, 2016). The document produced by the Global Alliance for Buildings and Construction (UN Environment, 2017) is more ‘operational’. Among its priorities for action it identifies the reduction of the embodied energy and operational energy that contribute to the calculation of the total energy used by the building (Barucco et alii, 2016; Gonzalez and Navarro, 2006; Treloar et alii, 2001). The embodied energy take into account the whole life cycle of the material and it is established through a cradle-to-grave analysis – it includes the energy necessary to extract raw materials, their processing and transportation, and also the energy to regular maintenance and ultimate disposal of the artifact (Dixit et alii, 2010; Verbeeck and Hens, 2010). The operational energy refers to the quantity of energy used during the operation of buildings to heating, cooling, ventilation, production of domestic hot water and illumination (Koskela, 1992).

If we analyse the estimations on the global consumption of materials and we consider that their use has increased by eight times in the last century up to 60 billion tons a year (Krausmann

et alii, 2009), of which about 40 % is used by the building industry (Kulatunga et alii, 2006), then we have to agree on the principle that the environmental issue should require the project to identify «solutions able to drastically reduce the consumption of resources and the production of impacts, with a new attention to the performances of materials and the hiring of the life cycle time horizon» (Campioli et alii, 2018, p. 86).

On the basis of the above premise, it is clear that the relationship between Project and Matter must have a more central role in the environmental subject and, with the consolidated support of the cultural and scientific tradition of Architectural Technology (Lucarelli, 2018), it must develop in-depth studies and research on the study of natural, renewable materials with reduced embodied energy and operational energy «[...] without any media exhibition of the innovation, nor renouncing to use materials as a vehicle – and, together, as content – of the quality of space and architecture» (Antonini et alii, 2017, p. 1). Within this cultural and scientific scenario outlined below, also supported by examples of contemporary rammed earth architecture in which the material has a structural function, this paper shows the results of an experimentation that aims to improve the performance of compressive strength of rammed earth with the contribution of nanotechnologies, developing a ‘new material’ with a reduced embodied energy and a reduced amount of CO₂ emissions into the atmosphere. A material able to limit the environmental issue and foster and encourage the re-appropriation and re-use of a traditional construction technology, both for the recovery/restoration of existing buildings and for the construction of new buildings with adequate dimensions, uses and climatic conditions or where to look for materials-plastic solutions to qualify the architecture.

Embodied Energy vs Operational Energy – The set of data mentioned feeds the concern for the environmental impact of materials, and, on the one hand, it clarifies the reason why adjectives such as ‘green’, ‘bio’, ‘sustainable’ or ‘ecological’ have become very popular in the building industry. But on the other, it does not explain why, as Fernando Pacheco-Torgal (2014) points out, the first studies on the LCA analysis of Portland cement – one of the most widely used building materials in the world, whose production is well over that of bricks, steel and wood together (Flatt et alii, 2012) – dates back only to 2012 (Van den Heede and De Belie, 2012; Habert et alii, 2012). In accordance with the regulation guidelines of the Energy Performance Building Directive 31/2010 (European Parliament and Council of the European Union, 2010) – recently updated with the European Directive 2018/844 (European Parliament and Council of the European Union, 2018) – the building industry has started creating and implementing high energy efficiency solutions and high-performance materials and components, promoting the construction of buildings classified as nearly Zero Energy Buildings (nZEB). The building industry has, however, neglected that in their production there is often an increase in embodied energy, justifiable only by a significant reduction in energy during the building’s operation phase – from a positive balance between embodied energy and operational energy

(Hammond, 2007; Sartori and Hestnes, 2007; Ibn-Mohammed et alii, 2013; Jia and Crabtree, 2015; Copiello, 2017).

Several studies question the possibility that the production of these high-performance materials can be balanced out by the decrease in energy required for the operational stage, since the embodied energy might represent almost half of the total energy used in a building life cycle and, sometimes, it exceeds operational energy (Crawford et alii, 2016). Greek researchers Panagiotis Chastas, Theodoros Theodosiou, Dimitrios Bikas and Karolos Kontoleon (2017) have examined the scientific literature on 90 residential buildings, deducing that, within their life cycle, in conventional artifacts the embodied energy accounts for a variable percentage between 6% and 20%, in the 'passive' ones for a percentage between 11% and 33%, in 'low energy consumption' buildings it fluctuates between 26% and 57%, while in nZEB between 74% and 100%. In Italy, we point out the LCA study on a PassivHaus in Umbria which, excluding the contribution from renewable sources from the calculation, shows higher values for the envelope and plants, which are between 48% and 61% (Proietti et alii, 2013).

In this perspective, it is clear that the search for efficiency only in the operational stage can be counterproductive for total energy consumption, because it does not guarantee sufficient benefits in terms of environmental sustainability of the artifact (Langston and Langston, 2008). On the contrary, the use of materials and traditional and more sustainable building techniques can make an important contribution to the eco-efficiency of the building industry (Pacheco-Torgal and Jalali, 2012), resulting in a 17% reduction in energy used in building (Miller, 2001) and cutting down CO₂ emissions by 30% (Crowther, 1999). The selection of building sustainable materials should not be focused only on technical performances, but mostly on the environmental impact and health/well-being of users (Ip and Miller, 2012; Ding, 2014).

Since the most commonly used building materials – cement, steel and aluminium – are energy-intensive and contribute significantly to the emissions of CO₂ into the atmosphere, during the production process (Akbarnezhad and Xiao, 2017), research on new 'low energy' materials, on their production method and recycling possibilities have become extremely important. A fundamental tool for assessing the environmental impacts of materials is the EPD – Environmental Product Declaration or Type III Environmental Label (Minkov et alii, 2015), which provides quantified environmental data using predetermined parameters and, if necessary, additional environmental information based on the ISO 14025 standard (2006). The EPD is a technical document, verified by a certification body, which accompanies the sale of the product and contains quantitative information based on the LCA method, as defined by the ISO 14040 Standard (2006). The CEN TC350 Committee – Sustainability of construction works (De Wolf et alii, 2017) – has outlined the Product Category Rules (PCR) for EPD of building materials in compli-

ance with the EN 15804:2012+A1:2013 standard. The PCR describes the life cycle stages – Product stage, Construction stage, Use stage, End of life stage, and an optional module Reuse-recovery (D) – that have to be considered in the environmental product declaration and which processes should be included.

In the Table 2 the mandatory and optional stages are listed, according to the system limit considered: the 'cradle to gate' analysis evaluates only the Product stage (A1-A3), which is therefore mandatory; in the 'cradle to gate with options' analysis, the Product stage (A1-A3) is mandatory while all other phases are optional; in the 'cradle to grave' analysis all phases are mandatory except 'D' which is optional. It should be noted, however, that while, on the one hand, the TC 350 standards, through the harmonized methodology currently proposed, provide an important tool for assessing the environmental performance and costs of the life cycle of buildings, on the other they have many limits which research and environmental policies of the different countries will have to face in the near future. In fact, the instrument's voluntary nature, accuracy of the measurements and the discretion of the data of some stages, do not allow to supply the real energy consumption of the materials and building components during their entire life cycle and, therefore, do not allow to uniquely evaluate their general energy balance.

Rammed Earth and Sustainability – Among the natural materials that can certainly be used in the building industry, providing a valid contribution to the environmental sustainability of buildings, there is rammed earth: an ecological and economic alternative to materials and production processes that are much more energy-intensive. Mud bricks do not require a large amount of energy since, unlike common bricks, they do not need cooking, when considerable quantity of CO₂ is emitted. Conversely, this material does not have a high mechanical strength and can't be used indiscriminately. However, in recent years, rammed earth has received great attention from the scientific community, as shown by the increase of published research, of which over a hundred in Scopus magazines (Pacheco-Torgal and Jalali, 2012). It is true that this quantity is only a small part compared to the articles published on Portland cement, but it has increased at least ten times compared to the articles on rammed earth published in the 1990s.

Several scholars have carried out research that compares the carbon dioxide emissions of buildings made with rammed earth with buildings

made with traditional masonry, concluding that the embodied energy used in rammed earth buildings is considerably lower than that energy for traditional masonry buildings, as well as their CO₂ emissions are significantly lower (Morton et alii, 2005; Shukla et alii 2008). The data provided by the Inventory of Carbon and Energy (Hammond and Jones, 2011) – a database on building materials showing data on embodied energy (MJ/kg) and CO₂ (kgCO₂/kg) emissions – shows that the soil has values of 0.45 MJ/kg and 0.023 kgCO₂/kg significantly lower than both Portland cement (5.50 MJ/kg and 0.93 kgCO₂/kg) and lime (5.3 MJ/kg and 0.76 kgCO₂/kg). These values increase when compressed earth is stabilized with 5% (0.68 MJ/kg and 0.060 kgCO₂/kg) or 8% (0.83 MJ/kg and 0.082 kgCO₂/kg) cement.

Contemporary Architecture with Soil – Soil is a building material with a thousand-year-old tradition – as the remains of the Greek fortification of Capo Soprano in Gela, Sicily, of 4th century B.C. show (Fig. 1). It is also shown by Middle Eastern cities entirely built with soil as Shibam in Yemen (16th century) also known as the Manhattan of the Desert (Fig. 2); by virtue of its versatility, this city is able to be in perfect balance with the environment: the earth lends itself to results accessible to any productive organization, from the simplest to the most complex. Moreover, it is an easily available resource in most geographical areas and the variety of the performances achievable through different executive techniques allows to produce artifacts suitable to pursue energy saving and comfort in different climatic contexts (Sposito, 2013). The characteristics of rammed earth include: high thermal inertia (due to its hygroscopic properties); the ability to maintain a constant humidity level of about 50% in indoor environments, thus avoiding humidity levels higher than 70%, responsible for mould (Arundel et alii, 1986) or the proliferation of mites and asthmatic diseases (Howieson, 2005); the different properties of acoustic insulation (linked to the 'elasticity' of the material), of electromagnetic wave reduction higher than all other construction materials (thickness of only 15 cm with soil around 99%), of air purification (thanks to the high porosity of the material that absorbs water vapour) and to eliminate condensation phenomena, especially interstitial condensation. The high maintainability, the effect of water and the compressive strength are its weaknesses.

Among the most widespread products attributable to rammed earth there is certainly adobe, a hand-compacted brick, with a mould and without compression, and left to dry naturally.

	Sample 1	Sample 2
Weight of sample	[g] 576.32	576.03
Weight in air of sample in paraffin	[g] 613.62	603.77
Weight of paraffin	[g] 37.30	27.74
Bulk weight of paraffin	[g/cm ³] 0.90	0.90
Volume of paraffin	[cm ³] 41.52	30.88
Net weight in water of sample in paraffin	[g] 294.32	293.42
Effective volume	[dm ³] 277.78	279.47
Density	[g/cm ³] 2.07	2.06
Mean density	[g/cm³] 2.07	2.07

Tab. 7 - Bulk Weight of Samples.



Figg. 21-26 - The samples during compressive strength tests (credits: Scalisi and Sposito, 2017).

Samples	Dimensions			Section (axb) [mm ²]	Mass [gr]	Tensile Strength [N]	Compressive strength [MPa]
	a [mm]	b [mm]	c [mm]				
C1	50.8	50.7	50.8	2576.1	266	8439	3.3
C2	50.4	51.1	51.0	2571.4	268	8550	3.3
C3	50.0	50.4	51.9	2518.0	262	9309	3.7
C4	51.4	51.6	51.5	2651.7	277	9081	3.4
C5	51.0	51.4	51.4	2621.4	270	8712	3.3
C6	51.0	51.3	51.5	2616.3	273	10245	3.9
Average compressive strength 3.4 Mpa difference 0.3 coefficient of variation 8.0%							

Tab. 8 - The results of compressive strength tests.

Among the most used, especially in recent times, we should mention the compressed block, a brick made with the aid of mechanical presses to increase the compression characteristics, and the extruded block, whose creation is similar to that of bricks. Another widespread construction technique is the pisé, which consists in moulding and compressing the soil in special formworks: the material is placed in layers of 5-12 cm and trod until it reaches layers of about 80 cm. The peculiarities of rammed earth, on the one hand, lend themselves to the creation of new highly sustainable artifacts, thanks to the plastic and iconographic potential of the material. On the other, they are extremely useful for interventions of integration in ancient soil buildings, eliminating any incompatibility – both physical and on identity – caused by modern materials. For these reasons,

some contemporary enlightened designers have ventured into rediscovering the sustainability characteristics of rammed earth by preferring the soil to other materials having line and more energy-consuming production processes.

Rammed earth has been used in many building types such as museums, schools, hotels, villas, especially in countries such as Australia, Canada or the United States, where regulations and standards for this building material exist since a long time. The NK'MIP Cultural Centre (Fig. 3) has been made in Canada, British Columbia, in an area belonging to Osoyoos Indians, marked by a peculiar habitat of the Canadian scenario. To the initial projects, by Hotson Bakker Boniface Haden Architects + Urbanistes (HBBH), made up of a cement building, a pisé wall has been added. It was made with local soil, colouring and a per-

centage of cement of just over 6% – to better integrate with the surrounding environment and meet the needs of the Indian community that struggled to identify with concrete buildings. In geographical contexts characterized by desert areas, integration with the surrounding landscape can only be achieved through the use of natural materials such as soil. The following examples should be seen in this perspective: the 1997 Dirt House in Scottsdale, Arizona, a one-story residential building by architect Neil Jones (Rael, 2008), the Palmer-Rose House in Tucson, Arizona, designed by the architect Rick Joy in 2001 with pisé walls – the same technique used for the hall at the McDowell Sonoran Preserve – and The TarraWarra Museum of Art (Figg. 4, 5) in Victoria, Australia, entirely made in soil in 2004 by architect Alan Powell. SanBaoPeng Art Museum (2017) in Jingdezhen, China, is more recent. A project by DL Atelier, that uses local rammed earth to delimit it with 150 m long and 4 m high partitions, the exhibition space, recalling, through the use of clay, the material with which the exposed ceramics are made. The two longitudinal partitions delimit the exhibition areas together with large transversal windows and allow the new architecture to integrate with discretion in a markedly naturalistic setting (Fig. 6).

In Europe, Martin Rauch is considered one of the pioneers of the modern techniques to apply traditional methods of building with soil. The Austrian architect has made a clay volume in the Chapel of Reconciliation in Berlin (Figg. 7, 8), inaugurating the first German Church in compressed clay (from 30 to 8 cm) with walls 60 cm thick and 7 metres high. The building is situated on the ruins of the old Church built in 1894, fallen into ruin after the construction of the Berlin Wall. The new project is made up by two elliptical buildings, placed one inside the other but with the main axes rotated orthogonally: the external oval is made of wooden plates while the inner one is made of compressed clay, mixed with fragments of stone and glass from the rubble of the previous church. The experimentation with rammed earth started by Martin Rauch in 1994 with the creation of his Atelier in Schlins, Austria (Figg. 9, 10) – which became a reference building for the professionals – and continued with several residential buildings. The Atelier, designed with the architect Roger Boltshauser, is a three-story building, made in compressed earth stratified with thin rows of bricks arranged in regular intervals, visible in the façade. The walls, the floors and the plasters are made entirely with the soil of earthworks, the result of the will to build a house only with sustainable materials. The soil house has a monolithic structure that looks like a sculpture block, abstract and artificial nature pushed upwards by the earth below. Finally, it is worth mentioning the new Ricola Kräuterzentrum in Laufren, Switzerland, a project by Herzog & de Meuron with the Lehm Ton Erde Baukunst GmbH (of Martin Rauch), bio/green manifesto of the well-known company producing aromatic herbs, that has always cared about environmental sustainability. The envelope – made with a mix with local soil, volcanic tuff aggregates from quarries within 8 km and lime – allows to integrate the structure with the surrounding landscape and, at the same time, to mitigate the operational energy consumption, helping to

stabilize the temperature and humidity levels necessary for processing the herbs (Fig. 11).

The Stabilization of Soil, Between Research and Experimentation – The scarce mechanical characteristics of rammed earth require, in order to be used in the artifacts, to subject it to a stabilization process that modifies the physico-chemical and mechanical properties of the earth-water system so that, by adding other materials, their strength and/or other properties can be improved for a long-lasting and compatible use for specific uses. The stabilization process of the soil has ancient origins in the building with rammed earth tradition, by adding vegetable or animal fibres (straw, horsehair), glue substances (casein, blood, animal dung, egg whites), cements, lime or bitumen (Danson et alii, 2015) made with mechanical, physical and chemical procedures (Houben and Guillaud, 1994). The first one involves the compacting of the earth, an action that modifies its density, mechanical strength, compressibility, permeability and porosity; the second one is performed with mixtures of different grain sizes and controlled by specific sieves; the third one, discussed in this paper, is the addition of other materials or chemical products. The scientific literature gives a fairly thorough picture of the researches and experiments that, in the last fifteen years, have provided for the use of different types of stabilizers (artificial, natural and mixed) to improve the mechanical performance of rammed earth.

Among the artificial stabilizers, cement is definitely the most used mostly for the proportional correlation between compressive strength and its dose in the mix (Morel et alii, 2007): the experiments that have produced rammed earth bricks with compressive strength of 9.4 MPa (Walker and Stace, 1997), of 6.5 MPa (Bahar et alii, 2004), of 6.4 MPa (Millogo and Morel, 2012) are different. Another tested stabilizer is lime, with which rammed earth bricks have been created, having a compressive strength between 3.03 MPa (Burrroughs, 2006) and 3.6 MPa (Millogo et alii, 2008). If the aforementioned experiments show that the two artificial stabilizers significantly improve the compression performances of rammed earth (whose environmental impact is irrelevant), it is also common opinion that cement and lime are anything but 'sustainable' and 'ecological' materials, since they have a high embodied energy. Therefore, this awareness has driven new experiments with the aim of determining the maximum percentages of cement and lime useful for improving the performance of the new mix at the same time mitigating its environmental impact (Ciancio et alii, 2014). Therefore, it was calculated that the maximum percentage of cement and lime to use – with reference to the energy impact of autoclaved aerated concrete (AAC) which is one of the lowest environmental impact materials among those cement-based – is equal to 8% for the first and 7% for the latter (Maskell et alii, 2014a). Actually, even with smaller percentages it is possible to have satisfactory performances: adding 5% of cement, in fact, gives a compressive strength equal to 7.4 MPa, definitely not an insignificant value compared with 2.9 MPa of minimum compressive strength in dry conditions (Maskell et alii, 2014).

Other studies focused on the stabilization of rammed earth using cement or lime mixed with

materials of natural origin such as Sugarcane Bagasse Ash (SBA) – a fibrous residue obtained from the sugarcane after extracting the juice. SBA and ordinary Portland cement, 8 and 10 percent respectively, can provide a compressive strength of 5.85 MPa (James et alii, 2016). Other experiments with the Sugarcane Bagasse Ash as a stabilizer were carried out by Sofia Lima (et alii, 2012), Richard Onchiri (et alii, 2014), Ramadhan Salim (et alii, 2014), Anil Pratap Singh and Piyush Kumar (2015), and Pakdee Khobklang (et alii, 2008). Another interesting research deals with the use of cement and lime with metakaolin, a 'natural' and 'sustainable' pozzolanic binder obtained by calcining the kaolinitic clays at a temperature of about 650 °C. The bricks are made by adding 5% of lime and 5% of metakaolin and have reached a compressive strength of 6.96 MPa while samples with the same percentages of cement and metakaolin have values of 3.73 MPa (Maskell et alii, 2015, 2016).

Finally, among the many studies that have used only natural stabilizers, prompted by a urgent sensitivity towards the ecosystem and recalling an already consolidated practice since ancient times, it is to be noted that many of them have experienced alternative additives, waste or by-products coming from different industrial sectors (Oti et alii, 2009; Tingle et alii, 2007). The different stabilization with *Hibiscus cannabinus* fibres make relevant examples – compressive strength equal to 2.9 MPa (Millogo et al., 2014), with tea processing waste – compressive strength of 7.6 MPa (Demir, 2006), with fruits of palm oil waste – compressive strength of 10.65 MPa (Ismail and Yaacob, 2011), with cassava skins – compressive strength of 2.15 MPa (Villamizar et alii, 2012). It is also worth mentioning a study that has experimented with the use of alginate (a natural polymer extracted from a marine algae) and sheep's wool to stabilize soils and to produce a sustainable, non-toxic and local composite building material (Galán-Marin et alii, 2010). Tests have shown that if adding alginate in the mixture increases the compressive strength to 3.77 MPa and that if adding wool increases the compressive strength to 3.05 MPa, when combined they significantly improve the resistance up to 4.44 MPa, a similar value to that obtained with 10% of Portland cement and greater than the result obtained with the highest percentages of lime (3.6 MPa).

The New Soil Experimentation with Clay Nanotubes – Within the scientific-experimental report, this paper illustrates the experimentation activities on rammed earth and nanotechnologies carried out by the Authors at the Architecture Department of the Polytechnic School of Palermo in 2017-2018. The experimental research was carried out with the aim of improving the performance of rammed earth bricks with the help of nanotechnologies, creating a 'new material' with reduced embodied energy and low CO₂ emissions into the atmosphere. Specifically, the analysed performances are related to the compressive strength that expand their area of use as a building material.

Materials, Methodology and Operational Stages – The rammed earth is a natural composite material originating from the combination of several mate-

rials (clay, sand, etc.) whose characteristics can be improved – through a stabilization process – by adding other materials. In this case, to the mix made up by soil (Fig. 12), sand (Fig. 13) and water we decided to add Halloysite (Fig. 14), a clay nanotube. This solution was supported by the bio-based nature that the nanostructured material guarantees and the performance potential that nanotechnology, in general, gives to the building sector (Scalisi, 2010).

About the materials in the mix it should be noted that: a) earth and sand were supplied by the Guglielmino Company in Misterbianco (CT) and come from the quarry called Roccaseli-Guglielmino Group, located in the Municipality of Motta S. Anastasia (CT); b) the chemical composition of the soil is listed in Table 3; c) the chemical composition and the granulometry of sand are shown respectively in Tables 4 and 5; d) the Halloysite Nanoclay used for this experimentation, whose characteristics are listed in Table 6 is produced by Applied Minerals Inc. and is available at Sigma-Aldrich. The Halloysite is a clay nanotubes with a diameter generally under 100 nanometres and with lengths ranging from about 500 nanometres to over 1.2 microns; it is chemically similar to kaolinite (Yuan et alii, 2015) and has a predominantly hollow tubular structure with a double layer of aluminium, silicon, hydrogen and oxygen. Not expensive, readily available and non-toxic material with high mechanical resistance (Farzadina et alii, 2013), the Halloysite – together with nanocomposites and nanometric powders – is part of a 'green nanotechnology' sector which aims to develop safe and ecologically less polluting products (Kamble et alii, 2012; Nasrollahzadeh et alii, 2019). Halloysite nanotubes have many commercial applications such as polymer and plastic additives, electronic components, drug delivery vehicles, cosmetics and household products (Lvov et alii, 2008; Zhang et alii, 2016; Lazara et alii, 2018), being inorganic materials for reinforcement. In general, adding 5% of Halloysite synergistically increases the strength of the polymer by 30-70% and improves its total adhesiveness (Lvov and Elshad, 2013).

The different materials (47% soil, 30% sand and 2% Halloysite) have been dry mixed and then water was added amounting to 21% of the weight (Fig. 15). To create the samples, the consolidated procedure used for the adobe was followed: the rammed earth brick was hand-moulded, with 50x50x50 mm steel moulds, without mechanical compression but completely filling the cavities and removing the excess material. Once the mould was rotated and the block was extracted, the elements obtained have been placed on a shelf in a dry and ventilated place to allow them to dry (Figg. 16-18). After a couple of days, they seemed solid enough to be turned and kept to dry – which lasted 28 days. While preparing the samples, two tests were necessary, before the final one, to determine the percentage of Halloysite to include in the mix: the first with 5% of Halloysite, the second with 3%. Both mixtures were excessively fluid, regardless the quantity of water used, pushing to reduce the percentage of Halloysite up to 2%, used for the production of the final samples. The samples obtained have undergone compressive strength tests (Figg. 19, 20). In the absence of specific regulations on rammed earth products,

the UNI EN 772-1:2011 standard was used 'Methods of Test for Masonry Units – Part 1: Determination of Compressive Strength', also used in other experiments on this material (Maskell et alii, 2014). In our case, this Standard was used as a reference for the testing methods with modifications on the 'conditioning of the samples for the compressive strength tests'.

Before performing compressive strength tests, the samples were prepared with cutting and grinding operations and by being changed and conditioned at a temperature of 20 ± 2 °C and at a humidity of $65 \pm 5\%$, up to constant mass. Furthermore, the bulk weight of some sample fragments (2 determinations per series of samples) was established using the hydrostatic weighing method (C.N.R. reference standard – B.U. n. 40), since the calculation with the geometric method was not reliable, due to the irregularity of the samples (Tab. 7).

Results, Debate and Future Developments – The samples subjected to the compressive strength test are 6, labelled with the acronyms C1, C2, C3, C4, C5 and C6 (Figg. 21-26). The results of each sample are listed in Table 8 that shows an average 'dry' compressive strength of 3.4 MPa. This is a satisfactory outcome, considering that in this new product stabilizers such as cement or lime were not used and that the minimum compressive strength under dry conditions is equal to 2.9 MPa (Maskell et alii, 2014). The value obtained is lower than that of the brick made with alginate and sheep's wool which has a compressive strength of 4.4 MPa (Galán-Marín et alii, 2010) or of the brick made with 5% cement and 5% metakaolin whose compressive strength is 3.73 MPa (Maskell et alii, 2015, 2016). But it is necessary to make some considerations: a) in both cases, the mixtures use more energy-intensive creation processes such as mechanical compaction (in case of alginate and wool mix) or extrusion (in case of metakaolin and cement mix); b) the bricks made with mechanical compaction and the extruded ones provide, even without stabilizers, greater resistance than the adobe; c) in the second case, the compressive strength is slightly higher – 3.4 and 3.7 MPa – even though it is an extruded brick with 5% cement in the mix.

Therefore, the research carried out has interesting margins for improvement. First, on the introduction of mechanical compression, considering that by using rammed earth, currently, a hand-made brick is unrealistic: the introduction of mechanical means in production, although it increases the embodied energy (which is still lower than that of other materials), it improves both the mechanical performance and the rammed earth production cycle. Furthermore, since the material is fragile under humid conditions, it will be necessary to check that the compressive strength in 'humid' conditions is not under 1 MPa, result of the tests performed by Maskell (et alii, 2014). Finally, since the Halloysite used in this experimentation is already on the market but, given its tubular shape, possible research developments – in a multidisciplinary perspective – may concern interventions aiming at loading the clay nanotubes in the laboratory, for example with biopolymers, and therefore use modified nanotubes in the mix.

Conclusions – Since the environmental issue is a

top priority, it is clear that the relationship between Project and Matter must regain a central role, despite the complexity of the set of requirements established by the modern era, especially considering the environmental aspects of the life cycle. In this sense, the figure of the Architect-Technologist as a qualified operator is decisive. He, by regaining possession of an often forgotten 'material' knowledge, should be able to manage the project with the awareness of the material and productive dimension of the processes, smartly and 'laically' manning technologies and incisively carrying out his cultural and professional role; «[...] a designer aware of the material and productive dimension of the processes: an architect able to dialogue with specialists (without being such), to translate figurative options, spatial configurations and fruitive needs in precise technical specifications and in coherent, efficient and sustainable construction devices, without losing an overview of the whole architectural design, as a cultured synthesis of eclectic and complementary knowledge» (Antonini et alii, 2018, p. 17).

Over the last twenty years, the industrial and commercial dynamics of technological innovation driven by the demands imposed by the pressing environmental issue have influenced materials, techniques and construction technologies invalidating established practices. These techniques considering reduced emissions, containment of operational energy consumption and ecological products, have produced artifacts often without identity «[...] with a value that is more identificatory than stylistic, [...] 'symbolic buildings' with two essential components: being 'symbols' in the urban confusion that surrounds them, but also that of replacing the 'modest' monuments of the past» (Dorfles, 2007, p. 8). The research carried out over the past few years on rammed earth responds, in this sense, to the two-fold request, on the one hand, to evaluate and design bio-based materials both from a technical performance point of view and mostly with respect to environmental performance, optimizing resources and production processes in order to reduce the most energy-intensive stages. And on the other hand, to make architecture recover its identity through coherence, language recognizability and relationship with places.

The cultural resistance to this material is part of the twelve obstacles wisely identified by Amr Sourani and Muhammad Sohail (2011) on the implementation of sustainable construction forms. We do not know how much the illustrated experimentation can contribute to overcoming prejudices on this material – definitely humble but sustainable and with performances that can be enhanced with the help of 'green nanotechnologies'. But we are sure that, today more than ever, a radical shift in the behavior of operators in the building sector is necessary (Francese, 2014). And what shouldn't also be delayed is: in-depth analysis of regulatory tools, incentives and financing tools, training and skills development, changes in users' behaviours and social practices for which the facilitation dialogue encouraged by the United Nations with the Talanoa Dialogue Platform and the United Nations Framework Convention on Climate Change in 2018 – and its common formal review scheduled in 2023 – can be a good fly-wheel, bridging the gap between climate ambi-

tions and current policies in the building industry.

ACKNOWLEDGEMENTS

The contribution, resulting from a common reflection, is to be attributed in equal parts to both Authors.

We would like to thank the Guglielmino Group both for supplying soil and sand and the technical support to the experimentation.

REFERENCES

- Akbarnezhad, A. and Xiao, J. (2017), "Estimation and Minimization of Embodied Carbon of Buildings: A Review", in *Buildings*, vol. 7, issue 5, pp. 1-24.
- Antonini, E., Rossetti, M. and Giglio, F. (2018), "Introduzione", in *Teche | Materia è Progetto*, vol. 16, pp. 17-19.
- Antonini, E., Rossetti, M. and Giglio, F. (2017), *Call for papers | Teche 16 | Materia è Progetto*. [Online] Available at: http://www.fupress.net/public/journals/38/CALL_16_ITA.pdf [Accessed 6 April 2019].
- Arundel, A., Sterling, E., Biggin, J. and Sterling, T. (1986), "Indirect health effects of relative humidity in indoor environments", in *Environmental Health Perspectives*, vol. 65, pp. 351-61.
- Bahar, R., Benazzoug, M. and Kenai, S. (2004), "Performance of compacted cement-stabilised soil", in *Cement & Concrete Composites*, vol. 26, pp. 811-820.
- Barucco, M. A., Verde, F. and Scalisi, F. (2016), "Innovazione tecnologica di sistemi, componenti e materiali | Technological innovation of systems, components and materials", in Lucarelli, M. T., Mussinelli, E. and Trombetta, C. (eds), *Cluster in progress. La Tecnologia dell'architettura in rete per l'innovazione/The Architectural technology network for innovation*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (RM), pp. 103-108.
- Burroughs, S. (2006), "Strength of Compacted Earth: Linking Soil Properties to Stabilizers", in *Building Research and Information*, vol. 34, issue 1, pp. 55-65.
- Campoli, A., Della Valle, A., Ganassali, S. and Giorgi, S. (2018), "Progettare il ciclo di vita della materia: nuove tendenze in prospettiva ambientale", in *Teche | Materia è Progetto*, vol. 16, pp. 86-95.
- Chastas, P., Theodosiou, T., Bikas, D. and Kontoleon, K. (2017), "Embodied Energy and Nearly Zero Energy Buildings: a Review in Residential Building", in *Proceedia Environmental Science*, vol. 38, pp. 554-561.
- Ciancio, D., Beckett, C. T. S. and Carraro, J. A. H. (2014), "Optimum lime content identification for lime-stabilised rammed earth", in *Construction and Building Materials*, vol. 53, pp. 59-65.
- Copiello, S. (2017), "Building energy efficiency: A research branch made of paradoxes", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 1064-1076.
- Crawford, R. H., Bartak, E. L., Stephan, A. and Jensen, C. A. (2016), "Evaluating the life cycle energy benefits of energy efficiency regulations for buildings", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 63, pp. 435-451.
- Crowther, P. (1999), "Design for disassembly to recover embodied energy", in Szokolay, S. S. (ed.), *The 16th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, 22-24 September 1999, Melbourne*, Brisbane, Cairns.
- Danso, H., Martinson, B., Ali, M. and Mant, C. (2015), "Performance characteristics of enhanced soil blocks: a quantitative review", in *Building Research & Information*, vol. 43, issue 2, pp. 253-262.
- Demir, I. (2006), "An investigation on the production of construction brick with processed waste tea", in *Building and Environment*, vol. 49, issue 1, pp. 1274-1278.
- De Wolf, C., Pomponi, F. and Moncaster, A. (2017), "Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice", in *Energy and Buildings*, vol. 140, pp. 68-80.
- Ding, G. K. C. (2014), "Life cycle assessment (LCA) of sustainable building materials: an overview", in Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J. and de Magalhães,

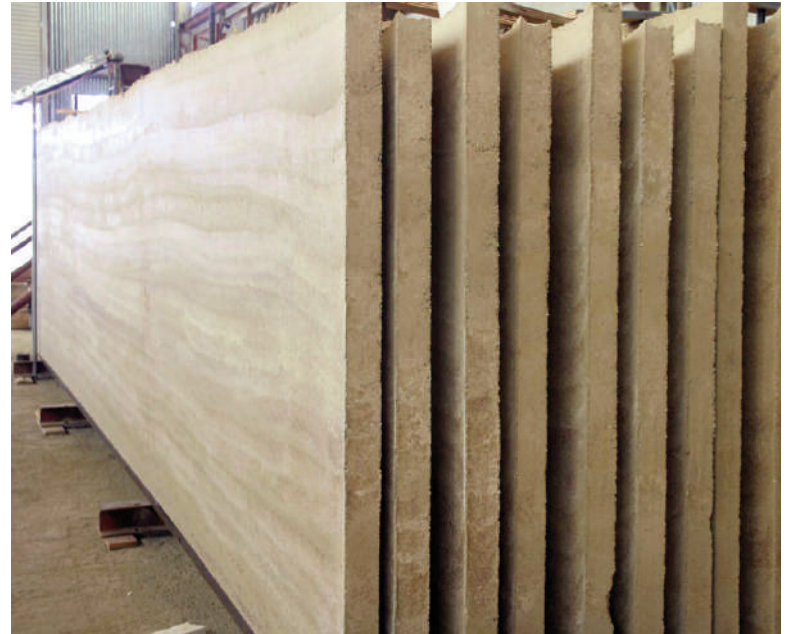


Fig. 27 - Pre-cast rammed earth wall, achieved with oxides, that was made to reflect the colours of Australia (credit: www.earthdwellings.com).

Fig. 28 - Pre-cast rammed earth panels waiting to be sawn to final dimensions and transported to the job site for final installation: a steel frame is installed on the back of each panel to use for attachment to the structural wall (credit: www.rammedearthworks.com).

A. (eds), *Eco-efficient Construction and Building Materials. Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 38-62.

Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S. and Culp, C. H. (2010), "Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review", in *Energy and Buildings*, vol. 42, pp. 1238-1247.

Dorfles, G. (2007), "L'Architettura contemporanea fra estetica e semantica", in *Agathón | Notiziario del Dottorato di Ricerca in Recupero e Fruizione dei Contesti Antichi*, Università degli Studi di Palermo – Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia, pp. 7-10.

EN 15804:2012+A1:2013, *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*. [Online] Available at: <http://store.uni.com> [Accessed 07 May 2017].

European Commission (2016), *The Road from Paris: assessing the implications of the Paris Agreement and accompanying the proposal for a Council decision on the signing, on behalf of the European Union, of the Paris agreement adopted under the United Nations Framework Convention on Climate Change*. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52016DC0110> [Accessed 06 April 2019].

European Parliament and Council of the European Union (2018), *Directive 2018/844/EU of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency*. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1559545496938&uri=CELEX:32018L0844> [Accessed 04 January 2019].

European Parliament and Council of the European Union (2010), *Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings*. [Online] Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32010L0031> [Accessed 04 January 2019].

Farzadina, N., Ali, A., Demirboga, R. and Parvez Anwar, M. (2013), "Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars", in *Cement and Concrete Research*, vol. 18, pp. 97-104.

Flatt, R., Roussel, R. and Cheeseman, C. R. (2012), "Concrete: An eco-material that needs to be improved", in *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, pp. 2787-2798.

Francese, D. (2014), "Recovering the Mediterranean Cultural Landscapes with Rammed Earth", in *Sustainable Mediterranean Construction | Rammed Earth*, vol. 1, pp. 34-39.

Galán-Marín, C., Rivera-Gómez, C. and Petric, J. (2010), "Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre", in *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1462-1468.

Gonzalez, M. J. and Navarro, J. G. (2006), "Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: practical case studies of three houses of low environmental impact", in *Building and Environment*, vol. 41, issue 7, pp. 902-909.

Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinasse, L. and Le Roy, R. (2012), "Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges", in *Journal of Cleaner Production*, vol. 35, pp. 250-262.

Hammond, G. P. (2007), "Industrial energy analysis, thermodynamics and sustainability", in *Applied Energy*, vol. 84, issue 7-8, pp. 675-700.

Hammond, G. and Jones, C. (2011), *Inventory of Carbon and Energy (ICE). Version 2*, Sustainable Energy Research Team (SERT), Department of Mechanical Engineering, Bath (UK). [Online] Available at: <https://www.carbonsolutions.com/Resources/ICE%20V2.0%20-%20Jan%202011.xls> [Accessed 16 April 2019].

Houben, H. and Guillaud, H. (1994), *Earth construction: a comprehensive guide*, Earth Construction Series, Intermediate Technology Publications, London.

Howieson, S. (2005), *Housing and asthma*, Spon Press, London.

Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L. and Acquaye, A. (2013), "Operational vs Embodied emissions in buildings: a review of current trends", in *Energy and Buildings*, vol. 66, pp. 232-245.

IEA (2017), *Tracking Clean Energy Progress 2017*. [Online] Available at: <https://www.iea.org/tcep/> [Accessed 8 May 2019].

Ip, K. and Miller, A. (2012), "Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime wall constructions in the UK", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 69, pp. 1-9.

Ismail, S. and Yaacob, Z. (2011), "Properties of Laterite Brick Reinforced with Oil Pal Empty Fruit Bunch Fibres", in *Pertanika Journal of Science and Technology*, vol. 19, issue 1, pp. 33-43.

ISO 14025 (2006), *Environmental labels and declara-*

tions – Type III environmental declarations – Principles and procedures. [Online] Available at: <http://store.uni.com> [Accessed 08 May 2017].

ISO 14040 (2006), *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and Framework*. [Online] Available at: <http://store.uni.com> [Accessed 06 May 2017].

James, J., Pandian, P. K., Deepika, K., Venkatesh, J. M., Manikandan, V. and Manikumar, P. (2016), "Cement Stabilized Soil Blocks Admixed with Sugarcane Bagasse Ash", in *Journal of Engineering*, vol. 2016, Article ID 7940239, pp. 1-9.

Jia, J. and Crabtree, J. (2015), "You get what you ask", in Jia, J. and Crabtree, J. (eds), *Driven by Demand: How Energy gets its Power*, Cambridge University Press, Cambridge (MA), pp. 3-10.

Kamble, R. Ghag, M., Gaikawad, S. and Kumar Panda, B. (2012), "Halloysite Nanotubes and Applications: A Review", in *Journal of Advanced Scientific Research*, vol. 3, issue 2, pp. 25-29.

Khobklang, P., Nokkaew, K. and Greepala, V. (2008), "Effect of bagasse ash on water absorption and compressive strength of lateritic soil interlocking block," in Limbachiya, M. C. and Kew, H. Y. (eds), *Proceedings of the International Conference on Excellence in Concrete Construction Through Innovation, Kingston University, London, 9-10 September 2008*, CRC Press, London, pp. 181-185.

Koskela, L. (1992), *Application of the new production philosophy to construction*, CIFE Technical Report 72, Stanford University, California.

Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H. and Fischer-Kowalski, M. (2009), "Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century", in *Ecological Economics*, vol. 68, pp. 2696-2705.

Kulatunga, U., Amaratunga, D., Haigh, R. and Rameezdeen, R. (2006), "Attitudes and perceptions of construction workforce on construction waste in Sri Lanka", in *Management of Environmental Quality an International Journal*, vol. 17, issue 1, pp. 57-72.

Langston, Y. L. and Langston, C. A. (2008), "Reliability of building embodied energy modelling: an analysis of 30 Melbourne case studies", in *Construction Management and Economics*, vol. 26, pp. 147-160.

Lazzara, G., Cavallaro, G., Panchal, A., Fankhrullin, R., Stavitskaya, A., Vinokurov, V. and Lvov, Y. (2018), "An

- assembly of organic-inorganic composites using halloysite clay nanotubes”, in *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, n. 35, pp. 42-50.
- Lima, S. A., Varum, H., Sales, A. and Neto, V. F. (2012), “Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash”, in *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 829-837.
- Lucarelli, M. T. (2018), “Nota”, in *Techne | Materia è Progetto*, vol. 16, pp. 7-8.
- Lvov, Y and Elshad, A. (2013), “Functional polymer-clay nanotube composites with sustained release of chemical agents”, in *Progress in Polymer Science*, n. 38, pp. 1690-1719.
- Lvov, Y. M., Shchukin, D. G., Mohwald, H. and Price, R. R. (2008), “Halloysite clay nanotubes for controlled release of protective agents”, in *ACS Nano*, vol. 2, issue 5, pp. 814-820.
- Maskell, D., Heath, A. and Walker, P. (2016), “Appropriate structural unfired earth masonry units”, in *Construction Materials*, vol. 169, issue 5, pp. 261-270.
- Maskell, D., Heath, A. and Walker, P. (2015), “Use of Metakaolin with stabilised extruded earth masonry units”, in *Construction and Building Materials*, vol. 78, pp. 172-180.
- Maskell, D., Heath, A. and Walker, P. (2014), “Inorganic stabilisation methods for extruded earth masonry units”, in *Construction Building Materials*, vol. 71, pp. 602-609.
- Maskell, D., Heath, A. and Walker, P. (2014a), “Comparing the environmental impact of stabilisers for unfired earth construction”, in *Key Engineering Materials*, vol. 600, pp. 132-143.
- Miller, A. J. (2001), “Embodied energy a life cycle of transportation energy embodied in construction materials”, in Ruddock, L. Chynoweth, P., Egbu, C., Sutrisna, M. and Parsa, A. (eds), *COBRA 2001 – Proceedings of the RICS Foundation Construction and Building Research Conference, 5 September 2001*, Glasgow Caledonian University, Glasgow (UK).
- Millogo, Y., Hajjaji, M. and Ouedraogo, R. (2008), “Microstructure and Physical Properties of Lime-Clayey Adobe Bricks”, in *Construction Building Materials*, vol. 22, issue 12, pp. 2386-2392.
- Millogo, Y. and Morel, J.-C. (2012), “Microstructural Characterization and Mechanical Properties of Cement Stabilised Adobes”, in *Materials and Structures*, vol. 45, issue 9, pp. 1311-1318.
- Millogo, Y., Morel, J.-C., Aubert, J.-E. and Ghavami, K. (2014), “Experimental Analysis of Pressed Adobe Blocks Reinforced with Hibiscus Cannabinus Fibers”, in *Construction and Building Materials*, vol. 52, pp. 71-78.
- Minke, G. (2000), *Earth construction handbook: the building material earth in the modern architecture*, WIT Press, Southampton (UK).
- Minkov, N., Schneider, L., Lehmann, A. and Finkbeiner, M. (2015), “Type III Environmental Declaration Programmes and harmonization of product category rules: Status quo and practical challenges”, in *Journal of Cleaner Production*, vol. 94, pp. 235-246.
- Morel, J.-C., Pkla, A. and Walker, P. (2007), “Compressive strength testing of compressed earth blocks”, in *Construction and Building Materials*, vol. 21, issue 2, pp. 303-309.
- Morton, T., Stevenson, F., Taylor, B. and Smith, N. C. (2005), *Low cost earth brick construction. Monitoring and evaluation*, Arc, UK.
- Nasrollahzadeh, M., Sajadi, S. M., Sajjadi, M., Issaabadi, Z. and Atarod, M. (eds) (2019), *An Introduction to Green Nanotechnology*, Series Interface Science and Technology, vol. 28, Academic Press-Elsevier, London.
- Onchiri, R., James, K., Sabuni, B. and Busieney, C. (2014), “Use of sugarcane bagasse ash as a partial replacement for cement in stabilization of self-interlocking earth blocks”, in *International Journal of Civil Engineering and Technology*, vol. 5, issue 10, pp. 124-130.
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M. and Bai, J. (2009), “Engineering properties of unfired clay masonry bricks”, in *Engineering Geology*, vol. 107, issue 3-4, pp. 130-139.
- Pacheco-Torgal, F. (2014), “Introduction to the environmental impact of construction and building materials”, in Pacheco-Torgal, F., Cabeza, L. F., Labrincha, J. and de Magalhães, A. (eds), *Eco-efficient Construction and Building Materials. Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp. 1-10.
- Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S. (2012), “Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction”, in *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 512-519.
- Proietti, S., Sringola, P., Desideri, U., Zepparelli, F., Masciarelli, F. and Castellani, F. (2013), “Life Cycle Assessment of a Passive House in a Seismic Temperate Zone”, in *Energy and Buildings*, vol. 64, pp. 463-472.
- Rael, R. (2008), *Earth Architecture*, Princeton Architectural Press, New York.
- Salim, R. W., Ndambuki, J. M. and Adedokun, D. A. (2014), “Improving the bearing strength of sandy loam soil compressed earth block bricks using sugarcane bagasse ash”, in *Sustainability*, vol. 6, issue 6, pp. 3686-3696.
- Sartori, I. and Hestnes, A. G. (2007), “Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: a review article”, in *Energy and Buildings*, vol. 39, pp. 249-257.
- Scalisi, F. (2010), *Nanotecnologie in Edilizia. Innovazione tecnologica e nuovi materiali per le costruzioni*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna (RN).
- Shukla, A., Tiwari, G. and Sodha, M. S. (2008), “Embodied energy analysis of adobe house”, in *Renew Energy*, vol. 34, pp. 755-61.
- Singh, A. P. and Kumar, P. (2015), “Light weight cement-sand and bagasse ash bricks”, in *International Journal of Innovative Research in Science and Technology*, vol. 1, issue 12, pp. 284-287.
- Sourani, A. and Sohail, M. (2011), “Barriers to addressing sustainable construction in public procurement strategies”, in *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, vol. 164, issue 4, pp. 229-237.
- Sposito, C. (2013), “Architettura in terra”, in Sposito, C. and Scalisi, F. (eds), *Terracruda e Nanotecnologie: tradizione, innovazione, sostenibilità*, Aracne Editrice, Roma, pp. 61-74.
- Tingle, J. S., Newman, J. K., Larson, S. L., Weiss, C. A. and Rushing, J. F. (2007), “Stabilization mechanisms of nontraditional additives”, in *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1989-2, issue 1, pp. 59-67.
- Treloar, G. J., Love, P. E. D. and Holt, G. D. (2001), “Using national input output data for embodied energy analysis of individual residential buildings”, in *Construction Management Economics*, vol. 19, issue 1, pp. 49-61.
- UN environment (2018), *Global Status Report 2018: Towards a zero-emission, efficient, and resilient building and construction sector*, Global Alliance for Building and Construction, International Energy Agency. [Online] Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27140/Global_Status_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 12 May 2019].
- UN environment (2017), *Global Status Report 2017: Towards a zero-emission, efficient, and resilient building and construction sector*, Global Alliance for Building and Construction, International Energy Agency. [Online] Available at: https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP%20188_GABC_en%20%28web%29.pdf [Accessed 12 May 2019].
- Van den Heede, P. and De Belie, N. (2012), “Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and ‘green’ concretes: Literature review and theoretical calculations”, in *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, pp. 431-442.
- Verbeeck, G. and Hens, H. (2010), “Life cycle inventory of buildings: a contribution analysis”, in *Building and Environment*, vol. 45, pp. 964-967.
- Villamizar, M. C. N., Araque, V. S., Reyes, C. A. R. and Silva, R. S. (2012), “Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks”, in *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 276-286.
- Walker, P. and Stace, T. (1997), “Properties of Some Cement Stabilised Compressed Earth Blocks and Mortars”, in *Materials and Structures*, vol. 30, pp. 545-551.
- Yuan, P., Tan, D. and Annabi-Bergaya, F. (2015), “Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects”, in *Applied Clay Science*, vol. 112-113, pp. 75-93.
- Zhang, Y., Tang, A., Yang, H. and Ouyang, J. (2016), “Applications and interfaces of halloysite nanocomposites”, in *Applied Clay Science*, vol. 82, issue 1, pp. 8-17.

^a CESARE SPOSITO, PhD Architect, is Associate Professor at the Department of Architecture, Polytechnic School, of the University of Palermo, Italy. His main research interests are the Conservation Process (focusing in particular on shelter systems for archaeological sites), *Innovative Materials for Architecture, Nanomaterials, Energy Saving in Buildings, Social Housing*. Mob. +39 328/00.89.765. E-mail: cesare.sposito@unipa.it

^b FRANCESCA SCALISI, PhD Architect and Research Manager at DEMETRA Ce.Ri.Med. (Centro Documentazione e Ricerca Euro-Mediterranea – Euro-Mediterranean Documentation and Research Center), Palermo, Italy. Her research areas are Green Materials, *Innovative Materials for Architecture, Nanomaterials, Energy Saving in Buildings*. E-mail: francescascalisi@gmail.com