

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

Scuola di ingegneria edile e architettura

Corso di laurea in ingegneria edile - architettura

a.a. 2020/2021

STUDIO DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEL CICLO DI
VITA DI UN EDIFICIO IN TERRA CRUDA IN MALI

Relatore:

prof. Luca Guardigli

Correlatore:

arch. Mattia Bertolini

Candidato:

Pietro Pedrazzi

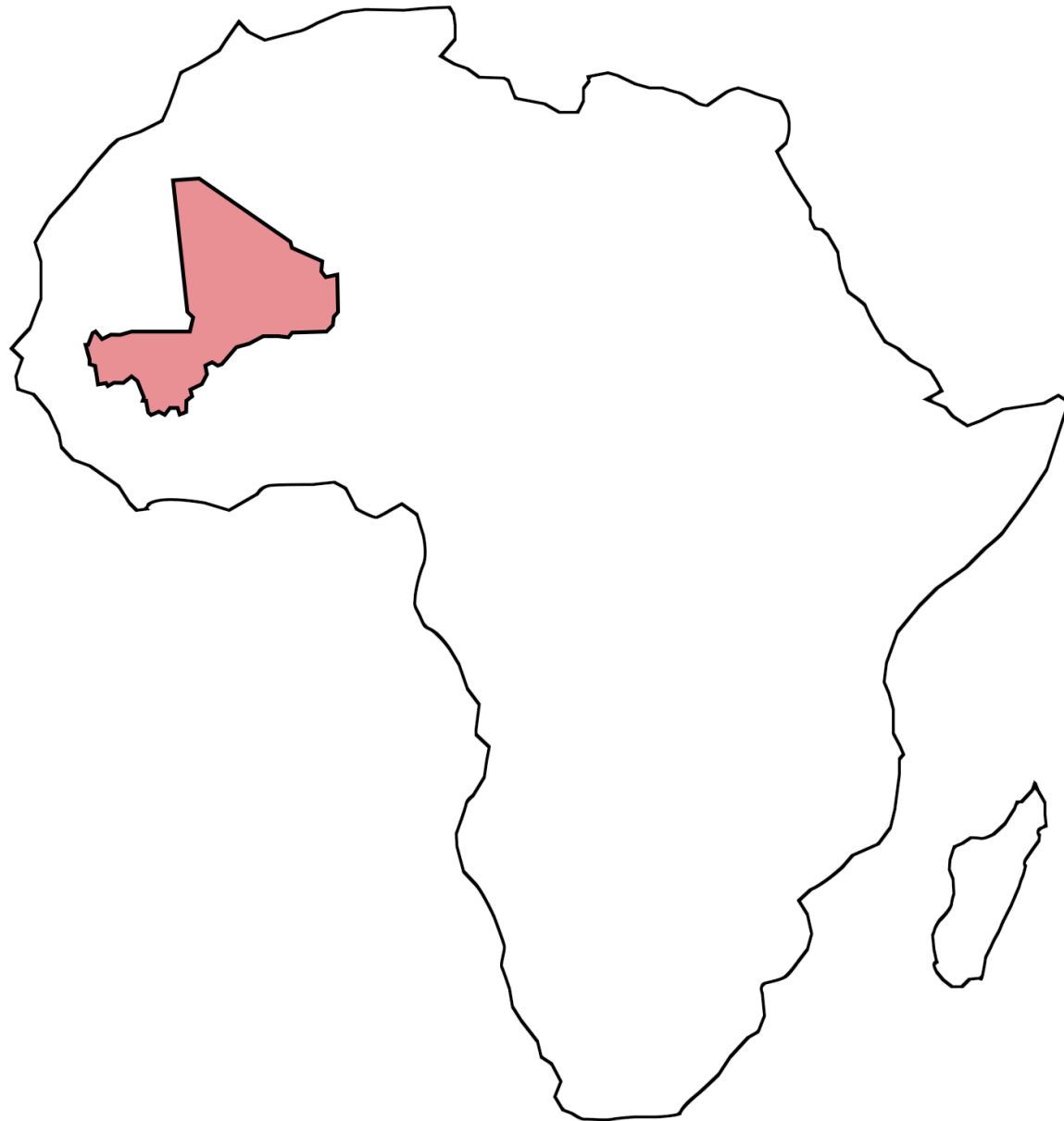
ABSTRACT

Questa tesi mira a valutare la sostenibilità ambientale ed economica di una scuola di tre classi, costruita in mattoni di terra cruda compressa a Dougourakoro, in Mali, seguendo i principi della progettazione bioclimatica. A questo scopo, è stato condotto uno studio LCA che compara due diversi casi di studio: l'edificio bioclimatico in mattoni compressi di terra cruda ed un edificio in mattoni forati di cemento, che rispecchia la tipologia costruttiva maggiormente diffusa localmente. L'utilizzo della terra cruda come materiale da costruzione, infatti, è stato localmente soppiantato negli ultimi decenni da mattoni in cemento che necessitano di una minore manutenzione.

I risultati dell'analisi LCA indicano un minore impatto ambientale dell'edificio in terra cruda, che si crede possa essere ulteriormente accentuato da una futura inclusione nell'analisi della fase di uso. I maggiori costi che è necessario sostenere durante la costruzione corrispondono ad una maggiore quantità dei materiali utilizzati e ad una superiore complessità delle lavorazioni durante la costruzione. Sintetizzando i risultati, si conclude che, nonostante l'edificio in terra cruda abbia un minore impatto ambientale, il potenziale inespresso di questo materiale è ancora altissimo, potendo manifestarsi appieno, però, solo dopo una rinnovata accettazione sociale, stimolata attraverso attività formative in loco che potrebbero portare ad una maggiore diffusione di conoscenze, conoscenze e macchinari legati a questo materiale, abbattendone così, i costi di produzione e costruzione.

SOMMARIO

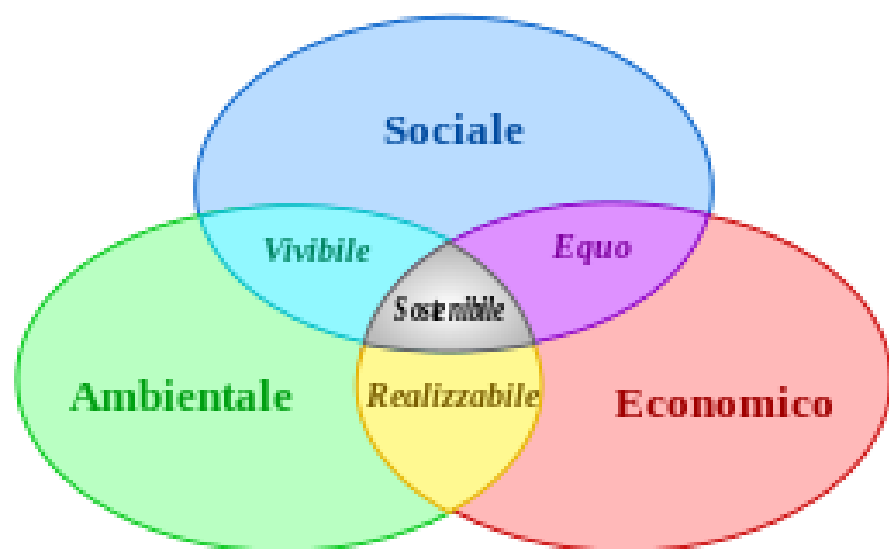
1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO	8
.Introduzione	
.Inquadramento generale	
.Inquadramento del caso di studio	
2. I MATERIALI: TERRA CRUDA E CEMENTO	18
.Il mattone ADOBE	
.Il mattone CEB	
.Il mattone CHB	
3. IL CASO DI STUDIO: KALAN DEME SO	32
.Progettazione bioclimatica	
.Il contributo del cemento	
.L'edificio finale	
4. LO STRUMENTO: LIFE CYCLE ASSESSMENT	40
.Struttura LCA	
.Goal & Scope	
.Confini del sistema	
.Unità funzionale	
.Raccolta dati	
.Categori d'impatto	
.Interpretazione	
5. FASE DI PRODUZIONE E COSTRUZIONE	50
.A1,2,3: dalla culla al cancello	
.Quantitativi	
.Risultati e osservazioni	
.Analisi economica	
.A4: dal cancello al sito	
.Risultati e osservazioni	
.A5: fase di costruzione	
.Risultati e osservazioni	
6. FASE DI USO	68
.Considerazioni iniziali ed esclusioni	
.B4: fase di sostituzione	
.Risultati e osservazioni	
7. FASE DI FINE DEL CICLO DI VITA	74
.Inquadramento	
.C1 e C2: demolizione e trasporto	
.Flusso dei materiali	
.C3 e C4: trattamento dei rifiuti e discarica	
.Risultati e osservazioni	
8. RISULTATI FINALI E CONCLUSIONI	84
.Risultati LCA	
.Conclusioni	
BIBLIOGRAFIA	95
REFERENZE FOTOGRAFICHE	97
RINGRAZIAMENTI	99



1. INTRODUZIONE ED INQUADRAMENTO

*.Introduzione
.Inquadramento generale
.Inquadramento del caso di studio*

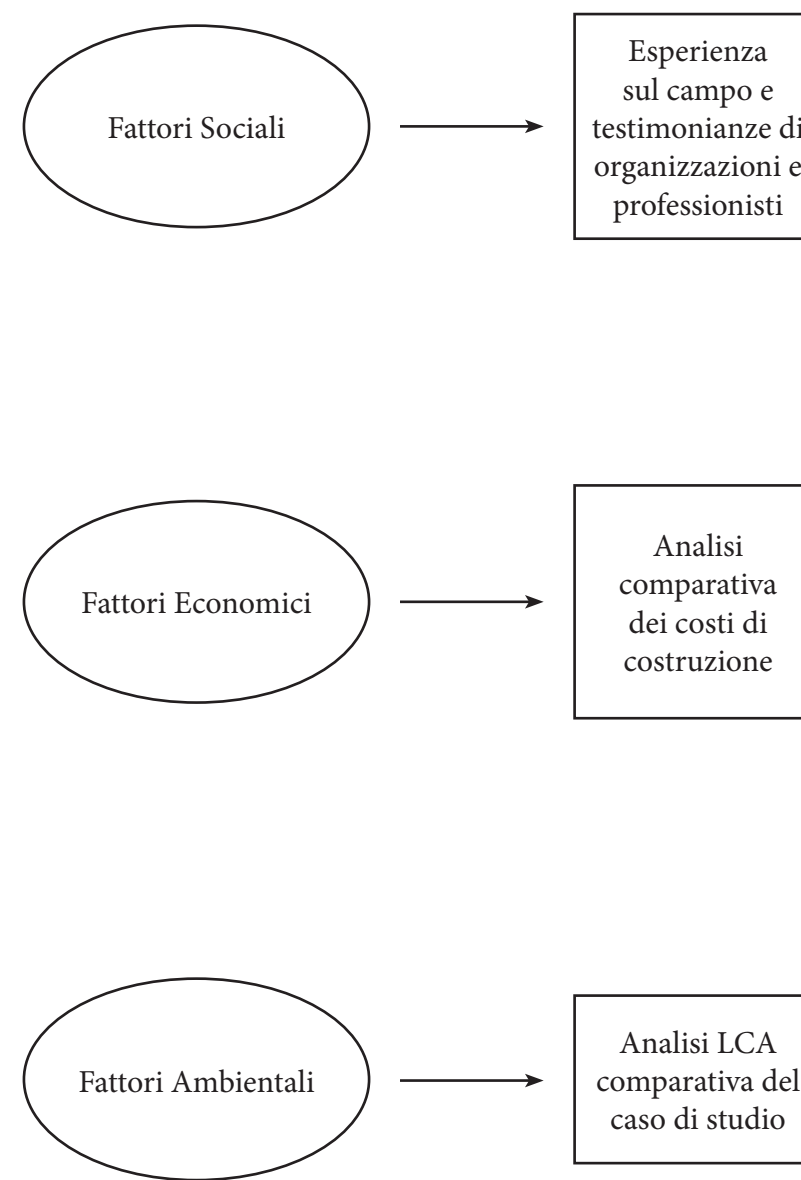
Il presente studio si cala nel più ampio panorama della ricerca di un processo di sviluppo sostenibile del settore dell'edilizia maliana e, più in generale, di tutta l'area dell'Africa saheliana, così da stimolare l'economia ed i mercati locali, mirando a soddisfare le necessità delle attuali generazioni senza compromettere la capacità di quelle future di soddisfare le proprie, come definito dalla commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo dell'ONU nel 1987. Il concetto di sostenibilità e quello di sviluppo sostenibile racchiudono in sé tre aspetti fondamentali: quello ambientale, quello economico e quello sociale. Si considera, perciò, necessario includere e capire le considerazioni e le relazioni che si creano fra questi fattori a seconda del luogo e dell'ambiente in cui si opera, analizzandoli separatamente e studiando le interazioni fra essi. Dato l'ambito estremamente vasto si vuole, in particolare, gettare le basi per una valutazione di sostenibilità di un materiale da costruzione come la terra cruda, il cui uso ha da sempre caratterizzato l'arte del costruire in tutta la zona del Sahel e che, unito ad una progettazione bioclimatica, si crede possa costituire una valida alternativa per il perseguimento di uno sviluppo sostenibile. Ci si concentra, in particolare, sulla realtà del Mali, paese dell'Africa occidentale nel quale è stato possibile avere un'esperienza sul campo, grazie alla quale sono stati raccolti dati e soprattutto esperienze e testimonianze, che andranno ad arricchire questo studio, rendendolo coerente con il contesto in cui si è agito, supportando la parte di calcolo e permettendo di arrivare a conclusioni compatibili con una realtà che rispecchia necessità ed esigenze estremamente differenti da quelle europee ed occidentali.



1.

Sopra: schema rappresentante le componenti della sostenibilità e le interazioni esistenti fra esse.

Durante la suddetta esperienza si è seguito il cantiere e la costruzione di una scuola realizzata con mattoni in terra cruda compressa (Compressed Earth Blocks), progettata secondo i criteri dell'architettura bioclimatica. Grande parte di questo studio si concentra, dunque, sulla valutazione e l'analisi dell'impatto ambientale durante il ciclo di vita di questo edificio. Si ritiene importante sottolineare fin da ora come la valutazione della sostenibilità ambientale sia di grande interesse personale ed il suo contributo sia fondamentale al raggiungimento della piena sostenibilità di un intervento, ma anche come la sua ricerca ed il suo conseguimento non siano sempre considerati prioritari, specialmente in realtà particolari come quella in cui ci si cala. I risultati dell'analisi condotta sono, perciò, da vedere come un obiettivo da poter raggiungere attraverso la realizzazione di uno sviluppo sostenibile che, però, non può prescindere da considerazioni ed analisi economiche, che verranno brevemente affrontate, e soprattutto dall'inquadramento sociale del contesto, che non può essere assolutamente ignorato nell'affrontare un tema come quello su cui si affaccia questo elaborato di tesi. Se, dunque, è stata svolta un'analisi del ciclo di vita di un edificio a sostegno dell'analisi della sostenibilità ambientale, anche una breve analisi dei costi di costruzione e dei materiali le è stata affiancata e di seguito verranno illustrate le principali considerazioni a livello sociale, che si ritiene indispensabile tenere presenti lungo tutto il corso dello studio, così da potere trarre conclusioni credibili e coerenti e non venire tratti in inganno nella lettura dei risultati. Avendo l'occasione di vivere sul posto sono raccolte testimonianze di organizzazioni e professionisti del settore attivi da lungo tempo e con una ben maggiore esperienza di chi scrive.

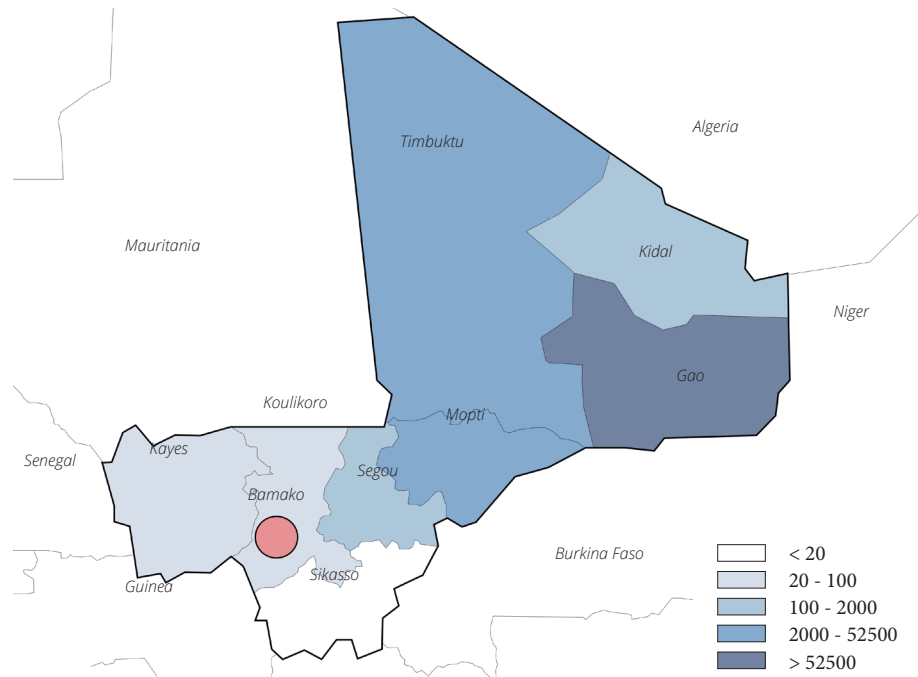


2.

Sopra: rappresentazione schematica delle informazioni necessarie a sviluppare lo studio e strumenti con i quali si sono raccolte e ricavate.

INQUADRAMENTO GENERALE

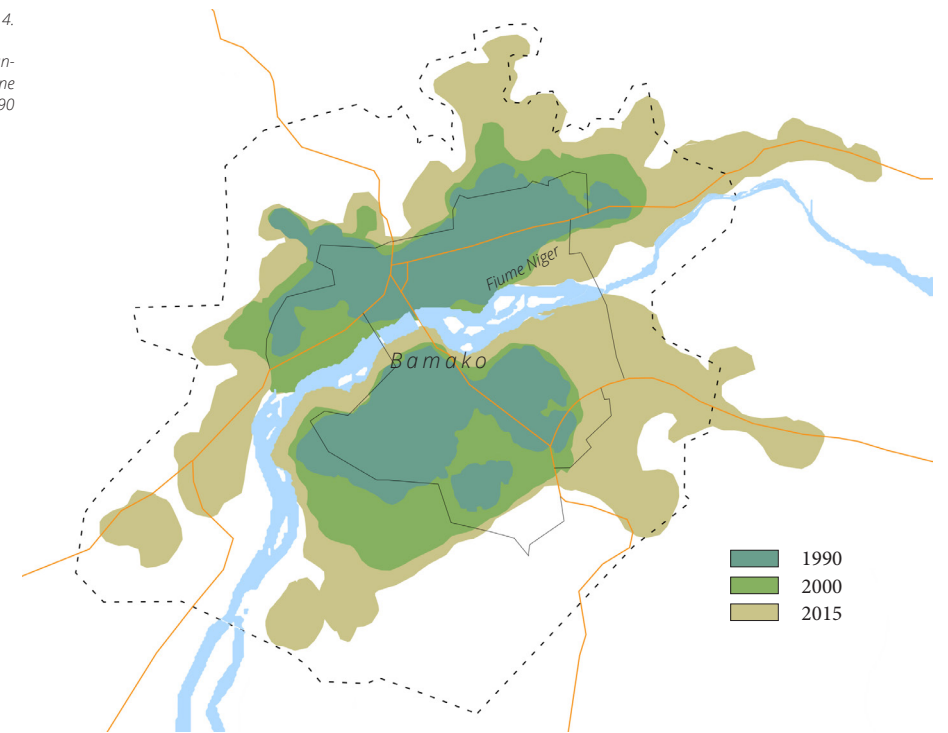
Il Mali è uno stato interno dell'Africa occidentale il cui territorio è caratterizzato a nord dalla presenza del deserto del Sahara, a sud dalla Savana ed è attraversato dal fiume Niger, attorno al quale si sviluppano le principali città ed attività. Dal 2012 questo stato, così come grande parte dell'area saheliana, è caratterizzato da una grande instabilità geopolitica dovuta all'alternarsi di colpi di stato (l'ultimo ad Agosto 2020) e ad una guerra civile alla quale non si è ancora realmente riusciti a trovare una soluzione stabile, che possa garantire una pacifica e solida base di ripresa per questo stato. Uno dei principali effetti di questa situazione di instabilità è la creazione di grandi flussi migratori, non solo verso gli stati confinanti o l'Europa, ma anche verso zone diverse del paese. Se da un lato, infatti, nel nord del Mali si assiste a repentini abbandoni di intere aree, dovuti alla concentrazione in queste zone dei principali conflitti ed all'avanzamento del fenomeno della desertificazione che rende inabitabili sempre più territori, dall'altro è evidente come la popolazione cerchi rifugio anche in realtà come Bamako, capitale del Mali e città che negli ultimi anni è stata caratterizzata da una rapida ed incontrollata espansione. Nonostante l'instabilità del paese, questi flussi migratori ed una costante crescita della popolazione maliana portano ad una sempre maggiore domanda di abitazioni, rendendo il settore delle costruzioni maliano in espansione. Esso rappresenta, infatti, il terzo settore produttivo dell'intero paese e contribuisce in maniera consistente al suo sviluppo economico. Avendo avuto l'occasione di potere essere presenti sul campo, si è osservato come, a supporto di questa espansione del settore edile sia presente una massiva importazione di materiali da costruzione. Ricercando fra i dati forniti dall'osservatorio per le complessità economiche (OEC) è stato confermato come il cemento, materiale maggiormente utilizzato per la costruzione di edifici, venga principalmente importato dal confinante Senegal (91,9% del totale di cemento importato), fino a diventare il terzo materiale importato dal Mali (4,11% del totale delle importazioni).



3. A lato: mappa rappresentante i numeri dei rifugiati dalle differenti regioni del Mali ad Ottobre 2016 secondo i dati UNHCR Sahel Operation.

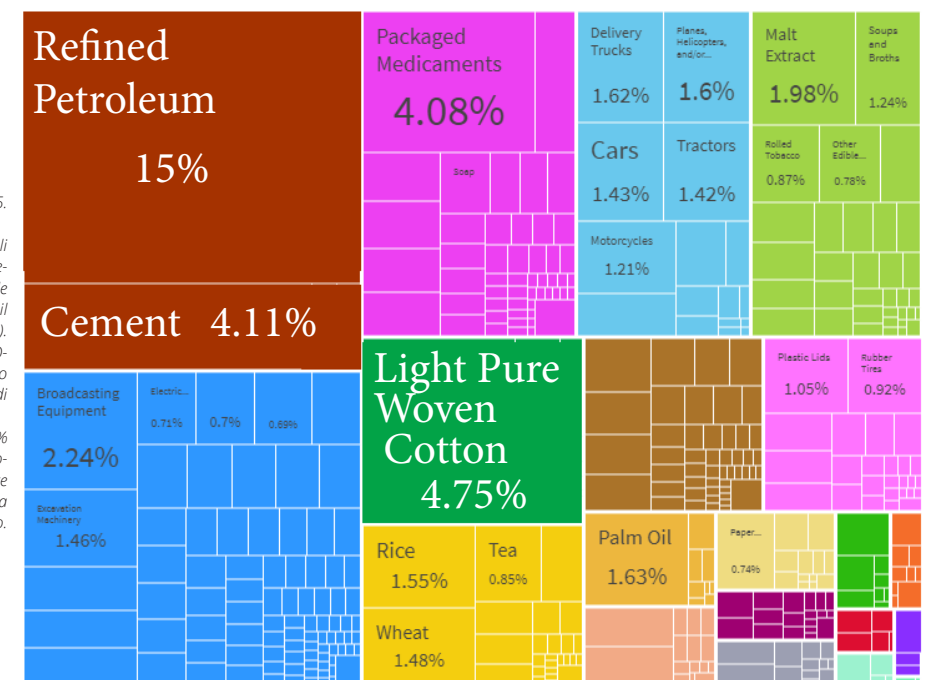
4.

Sopra: rappresentazione dell'espansione delle aree urbane e suburbane della città di Bamako dagli anni '90 fino al 2015.



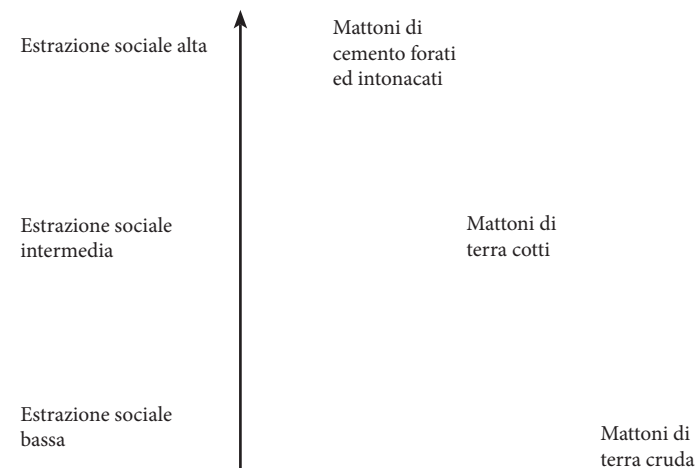
5.

Grafico rappresentante i materiali importati dal Mali nel 2018. Il cemento rappresenta il terzo materiale dopo il petrolio (15% del totale) ed il cotone intrecciato (4,75% del totale). I dati sono stati presi dal sito dell'OEC e fanno riferimento all'anno 2018 per un totale di 3,6 miliardi di dollari. Sempre secondo i dati OEC il 91,9% del cemento importato in Mali proviene dal Senegal, mentre la restante percentuale è ugualmente divisa fra Costa d'Avorio, Turchia e Portogallo.



L'importazione di cemento frena, senza dubbio, lo sviluppo dell'economia locale, che potrebbe sfruttare in modo assai migliore la crescente domanda abitativa. In quest'ottica si sono andati ad approfondire le ragioni dell'abbandono dell'uso di un materiale da costruzione come la terra cruda, che da sempre caratterizza la zona saheliana e che in Mali ritrova ancora oggi fra i migliori esempi di costruzioni, che costituiscono una parte fondamentale del patrimonio culturale ed identitario di questo stato. Oltre alle ragioni tecniche e legate ai comportamenti dei materiali, che verranno affrontate nei seguenti capitoli, si ritiene necessario illustrare fin da ora quanto emerso durante l'esperienza sul campo e dal confronto con diversi professionisti del settore attivi nella zona saheliana da almeno trent'anni. Si nota, dunque, come nonostante la presenza di maestranze abbastanza abili e di esempi di buone costruzioni in terra cruda, negli ultimi decenni si è avuto un rapido abbandono dell'utilizzo di questo materiale da costruzione. Dopo diverse indagini e confronti con persone e realtà locali, emerge che la motivazione per la quale la maggior parte della popolazione non vuole un'abitazione in terra cruda è di tipo principalmente culturale: la tecnologia del mattone in terra cruda è, infatti, ritenuta espressione di estrema povertà e sinonimo di bassa estrazione sociale. A questa viene preferito l'uso di mattoni forati fabbricati con un mix di sabbia, ghiaia e cemento, tecnologia che viene ritenuta più igienica e confortevole. Nella cultura locale, i "livelli" di benessere legati alle tecniche di costruzione possono essere definiti come segue:

- Livello basso: rappresentato dall'edificio in terra cruda, esso denota l'appartenenza ad un ceto di modestissima estrazione sociale.
- Livello intermedio: rappresentato dall'edificio in mattoni di terra cotta, denota l'appartenenza ad un ceto di media-bassa estrazione sociale, ma indica soggetti che hanno un reddito.
- Livello alto: rappresentato da un edificio in muratura di blocchi di cemento intonacato e denota l'appartenenza al ceto medio emergente.



6.

Grafico rappresentante la relazione fra livello di estrazione sociale e materiale con cui sono realizzati gli edifici.

Appurati questi fattori culturali, risulta fondamentale una riflessione, prima di intraprendere qualsiasi altra analisi economica od ambientale per proseguire sulla strada del raggiungimento e della verifica della sostenibilità legata all'utilizzo della terra cruda come materiale da costruzione: bisogna gettare le basi per una nuova o rinnovata accettazione sociale del materiale, che slegli il concetto di edificio in terra cruda da quello di estrema povertà. Si rende necessaria, dunque, una grande e costante attenzione per dimostrare la qualità della progettazione, delle finiture ottenibili, l'igiene degli ambienti e l'equivalenza in tema di durabilità e manutenzione con gli edifici in mattoni di cemento. Oltre a questo, si ritiene molto utile e prioritaria una vera svolta culturale, attraverso la quale si possano creare conoscenze a livello locale non solo sul materiale e sulle sue caratteristiche, ma anche sulle tecniche di progettazione che riguardino i concetti di ventilazione naturale ed isolamento termico. Solo con queste basi è possibile sviluppare una migliore sostenibilità del costruito, evitando una progettazione inadeguata che rende necessaria l'installazione di impianti di raffrescamento che il più delle volte risultano altamente energivori. La sensibilità riguardo a queste necessità non manca e le iniziative per favorire la formazione e la diffusione di queste conoscenze sono sempre più numerose. Si ritiene, perciò, sensato proseguire con lo studio attraverso metodi più scientifici per ricavare risultati a livello ambientale che, si chiarisce nuovamente, dovranno essere letti tenendo ben presente la realtà locale appena illustrata ed essere visti come possibile obiettivo o risultato raggiungibile solo attraverso una serie combinata di azioni su diversi fronti.

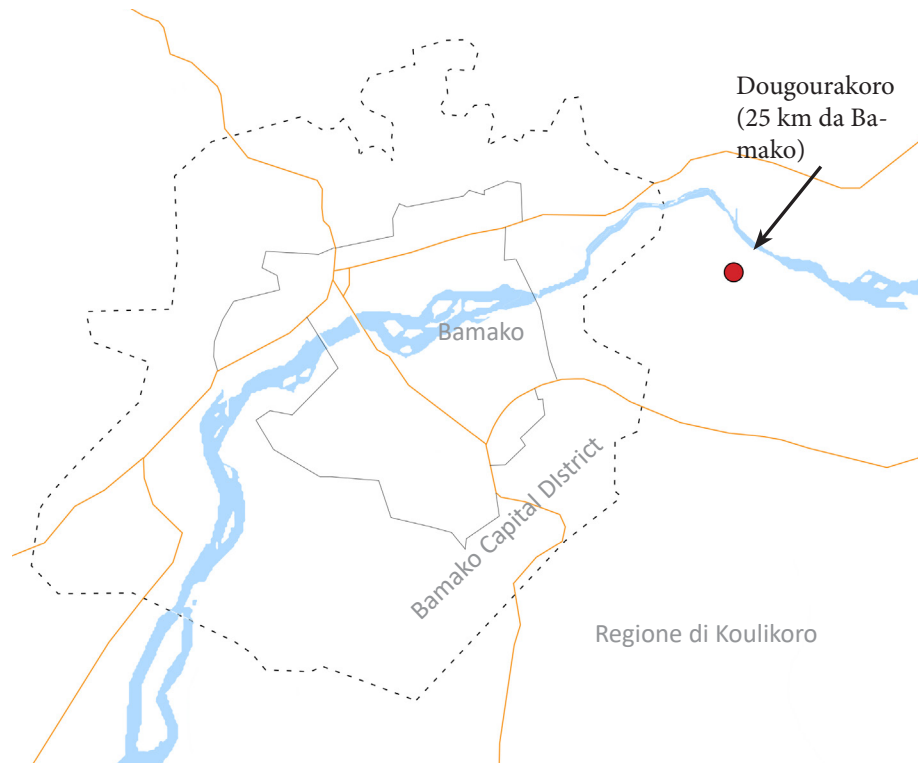


7.

Sopra: vista della Grande moschea di Djenné, interamente costruita in terra cruda ad inizio 1900. Essa rappresenta un immenso patrimonio artistico e culturale per il Mali, tanto che ogni anno, dopo la stagione delle piogge, gran parte della popolazione locale prende parte alla festa durante la quale l'edificio viene completamente ricoperto di intonaco in terra cruda per preservarlo dall'erosione dovuta agli agenti atmosferici. (Photo Credits to Michele Cattani)

INQUADRAMENTO CASO DI STUDIO

La costruzione di una scuola di tre classi, progettata da Mattia Bertolini secondo criteri bioclimatici, è stata seguita in loco fin dal principio. Si è colta questa occasione per approfondire ulteriormente gli aspetti ambientali ed economici di un simile edificio e per questo è stata condotta un'analisi del ciclo di vita (analisi LCA) dell'edificio costruito, comparandolo con il corrispettivo che si ipotizza realizzato con mattoni forati in cemento. L'intervento è stato realizzato a Dougourakoro, un piccolo villaggio situato sulle rive del fiume Niger a circa 30 chilometri di distanza dalla capitale Bamako. In una zona dove l'attività più diffusa, nonché principale fonte di sostentamento, è l'agricoltura, si è cercato di utilizzare quanto più possibile le risorse locali e di collaborare esclusivamente con professionisti del luogo che fossero particolarmente propensi all'utilizzo dei mattoni in terra compressa. Lo studio AGREBAT SARL ha seguito la progettazione strutturale ed il cantiere di Dougourakoro, contribuendo alla buona riuscita di tutta l'opera. Riprendendo quanto detto in precedenza e scandendo i principi generali esposti alla dimensione del singolo cantiere è importante sottolineare come nonostante la propensione degli ingegneri locali ad un utilizzo "nobile" della terra cruda come materiale da costruzione, questi abbiano ritenuto assolutamente necessario inquadrare il sistema in muratura in un telaio in calcestruzzo armato, non fidandosi della tenuta strutturale della muratura. Non si vuole discutere all'interno di questo elaborato di tali scelte progettuali, ma si ritiene rilevante sottolineare questo fatto sia per dare credito a quanto espresso in precedenza e frutto dell'esperienza, sia per trarre conclusioni finali corrette e potere leggere i dati risultanti dalle analisi in modo solidale e conforme con la realtà.



8.

A fianco: mappa rappresentante il distretto di Bamako e la posizione di Dougourakoro, dove l'edificio in esame è stato costruito, a 25 chilometri dalla capitale.



9.

Sopra: veduta aerea del villaggio di Dougourakoro e dell'area circostante

Sotto: veduta aerea del sito dove l'edificio è stato realizzato





2.

I MATERIALI: TERRA CRUDA E CEMENTO

.Il mattone ADOBE

.Il mattone CEB

.Il mattone CHB

Esprese le considerazioni fondamentali per inquadrare e capire il contesto in cui si è operato, si procede ad illustrare i metodi di produzione attraverso i quali sono ottenuti i principali materiali da costruzione in Mali e se ne vanno a descrivere le caratteristiche. In una realtà dove le disponibilità economiche sono spesso limitate e le risorse scarseggiano, i materiali da costruzione sono ottenuti tramite l'impiego della terra, che permette la creazione di mattoni e che può eventualmente essere pressata con l'utilizzo di macchinari meccanici, o l'uso di aggregati che vengono estratti e raccolti localmente e con cui, aggiungendo una definita quantità di cemento, vengono fabbricati i caratteristici mattoni forati in cemento, che risultano il materiale da costruzione nettamente più utilizzato nel settore dell'edilizia maliana. Per quanto riguarda il legno, questo viene utilizzato nelle attività della vita quotidiana ed a supporto della costruzione di edifici ma, vista la sua scarsità in uno stato che per più di metà è occupato dal deserto del Sahara e fortemente influenzato dai problemi dovuti all'avanzamento del fenomeno della desertificazione, non viene utilizzato come materiale da costruzione. L'acciaio, strutturale e non, viene completamente importato, arrivando principalmente in Senegal dagli stati europei o dalla Cina ed in seguito è smistato dal porto di Dakar in tutta la zona saheliana attraverso l'utilizzo di trasporto su gomma.

La terra è usata come materiale da costruzione fin da tempi antichissimi e le modalità di utilizzo sono diverse, a seconda delle tecnologie disponibili e delle maestranze presenti. In Mali, questa viene utilizzata per formare mattoni attraverso l'utilizzo di stampi o di presse che permettono di ottenere elementi uniformi e dalle migliori prestazioni.

IL MATTONE ADOBE



10.

Sopra: fabbricazione di mattoni in terra cruda Adobe. L'impasto di terra, acqua e materia organica viene inserito all'interno di stampi che vanno a donare al mattone la tipica forma. Le dimensioni standard di un mattone Adobe sono di 7x20x40 cm.

L'esempio più antico, più economico e più diffuso di mattone in terra cruda è il così detto Adobe. Si tratta di un mattone formato da terra prevalentemente argillosa, che viene modellato a mano grazie all'utilizzo di stampi. Viene essiccato all'aria per alcuni giorni e talvolta viene ricoperto con dei teli durante questa fase. Per la sua fabbricazione, argilla, limo e sabbia vengono mescolati con acqua per raggiungere un buon livello di lavorabilità e spesso viene inserita una parte di materiale organico fibroso per evitare che il mattone si fessuri durante la fase di essiccazione. Il mattone Adobe rappresenta una soluzione rapida ed economica, specialmente in presenza di cantieri ed edifici di limitate dimensioni. La sua resistenza all'acqua è minima e per questo motivo, nell'intento di preservare l'edificio, deve essere ricoperto di intonaco in terra cruda con cadenza annuale. Come per le altre tipologie di mattone, la maggior parte delle volte, se le dimensioni dell'edificio e del cantiere lo consentono, i mattoni vengono fabbricati sul luogo del cantiere ed in particolare per quanto riguarda la fabbricazione degli Adobe, anche la terra viene estratta sul sito. Sempre sul sito viene creata la malta, preferibilmente argillosa, con cui gli elementi vengono legati fra loro e che viene disposta in modo da formare spessi strati che arrivano ad avere uno spessore di almeno 2 cm. La forma dei mattoni è data dallo stampo che viene utilizzato ed i mattoni tendono ad avere delle dimensioni di 7x20x40 cm, ma, nonostante l'utilizzo di stampi, questo mattone, specialmente sulle facce che non entrano in contatto con lo stampo, risulta irregolare nella forma, fatto che giustifica l'utilizzo di uno spesso strato di malta fra un elemento e l'altro.

L'uso del mattone Adobe è sinonimo, localmente, di bassa estrazione sociale e di estrema povertà e risulta il materiale da costruzione più economico reperibile localmente.



11.

A lato: mattoni Adobe pronti all'uso e depositati in cantiere. L'utilizzo di questo tipo di mattone denota un'estrema povertà e viene utilizzato principalmente per opere edili di poca importanza e di ridotte dimensioni. Esso rappresenta, però, il materiale con cui sono realizzate le principali costruzioni che fanno parte del patrimonio storico, artistico e culturale del Mali.

12.

A lato: estrazione in situ di terra argillosa per la produzione di malta che faccia da legante fra i diversi mattoni Adobe.



13.

A lato: costruzione di un piccolo edificio in mattoni Adobe. Particolare della fase di posa dei mattoni e dell'utilizzo di spessi strati di malta (2-3 cm) per legare gli elementi fra loro e sopperire alla forma irregolare.



IL MATTONE CEB

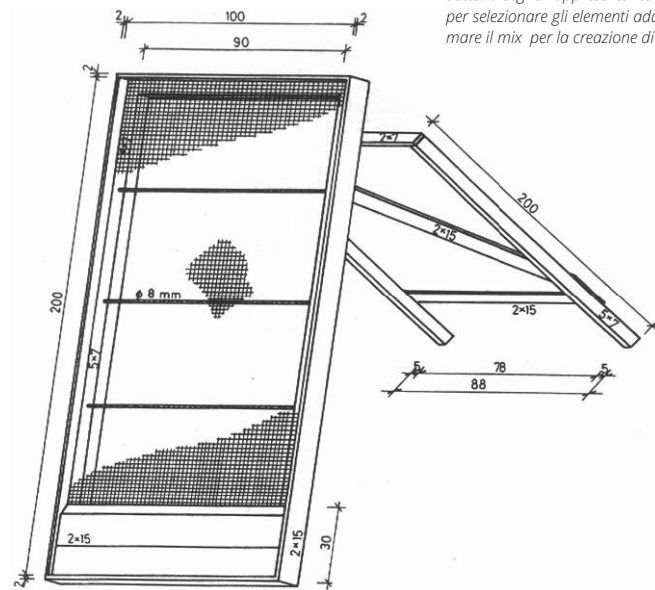
Sfruttando le tecnologie esistenti e disponibili in loco si è sviluppato, nel corso degli anni, un mattone in terra cruda dalla forma e soprattutto dalle caratteristiche meccaniche migliori del semplice Adobe. Il mattone in terra compressa (CEB) viene ottenuto tramite l'utilizzo di presse manuali o meccanizzate che esercitando la pressione per la quale sono state progettate, vanno a comprimere un composto equilibrato di argilla, limo, sabbia e ghiaia fine. La produzione industriale di questo materiale è poco diffusa e non sostenibile economicamente e, come per il caso precedente, i mattoni vengono realizzati in cantiere, il quale viene dotato di una zona adibita alla produzione di mattoni ed in cui viene portata la pressa. Una volta pressati, i mattoni vengono lasciati ad essicare per circa due settimane, durante le quali sono regolarmente inumiditi per evitare un'essiccazione troppo rapida che potrebbe causare fessurazioni. Gli elementi che vanno a comporre il mattone sono selezionati tramite l'utilizzo di un setaccio che permette di prelevare gli elementi di dimensione inferiore agli 8 mm. I mattoni in terra compressa vengono fabbricati con una dimensione standard di 9x14x29,5 cm ed in seguito possono essere scomposti in moduli di 9x14x14 cm o di 9x14x21 cm. Uno strato di malta di 1,5 cm viene usato per legare i mattoni fra loro.

Per migliorare le prestazioni meccaniche di questi mattoni e per renderli maggiormente resistenti all'acqua, viene spesso inserita una parte di cemento, che può variare dal 4% al 12% del totale, che va a stabilizzare il materiale e che tramite il processo di idratazione restituisce un mattone formato da una matrice inerte sabbiosa simile al cemento, da una matrice di argilla stabilizzata e da una matrice di terra non stabilizzata.

Tralasciando le soluzioni automatizzate, le presse esistenti e progettate per la creazione di mattoni CEB si dividono in due tipologie: presse leggere e presse pesanti, con queste ultime capaci di applicare una pressione maggiore e garantire un maggiore rendimento.

14.

Sotto: disegno rappresentante il setaccio utilizzato per selezionare gli elementi adatti ad andare a formare il mix per la creazione di mattoni CEB



15.

A lato: pressa CINVA-RAM, appartenente alle presse leggere, progettata e costruita a Bamako durante l'esperienza in loco in collaborazione con fabbri locali. Una pressa di questo tipo è facilmente trasportabile ma ancor più facilmente costruibile anche in realtà particolarmente isolate come possono essere quelle dei villaggi maliani più lontani dalla capitale Bamako. Questo tipo di presse sono anche maggiormente soggette all'usura, garantiscono una limitata produttività e compressione.



16.

A lato: pressa TERSTARAM. Questo tipo di pressa è caratterizzato da grandi dimensioni e da un peso (340kg) non trascurabile. Esercita sulla terra inserita all'interno dello stampo una pressione di 20 bar ed il suo funzionamento è completamente manuale. La pressa viene spostata di cantiere in cantiere in quanto la sua fabbricazione non risulta immediata. La pressa in foto, presente sul cantiere di Dougourakoro, proviene dal Belgio.





17.

Sopra: spazio del cantiere adibito alla produzione ed allo stoccaggio dei mattoni CEB durante la costruzione dell'edificio. Dopo essere stati pressati, i mattoni vengono lasciati essiccare all'ombra per due settimane e vengono regolarmente inumiditi per evitare fessurazioni durante questa fase.

Il mattone CEB rappresenta un netto miglioramento rispetto al mattone Adobe per quanto riguarda regolarità della forma e prestazioni meccaniche che vengono garantite attraverso la pressione esercitata dalla pressa. La resistenza all'acqua di questi elementi non è ottimale ma risulta estremamente migliorata rispetto a quella di un mattone non pressato che inizia a disgregarsi alle prime piogge. La durabilità dei mattoni CEB raramente viene migliorata attraverso l'uso di intonaci in terra, come quelli applicati annualmente a protezione dei mattoni Adobe. Oltre alla già citata percentuale di cemento che viene frequentemente inserita nel mix, vengono anche applicate vernici idrorepellenti che garantiscono un'ottima resistenza all'acqua e che richiedono in media una nuova applicazione con cadenza triennale. Si ritiene importante specificare queste alternative per poter trarre conclusioni finali che possano stimolare un minore impatto ambientale.

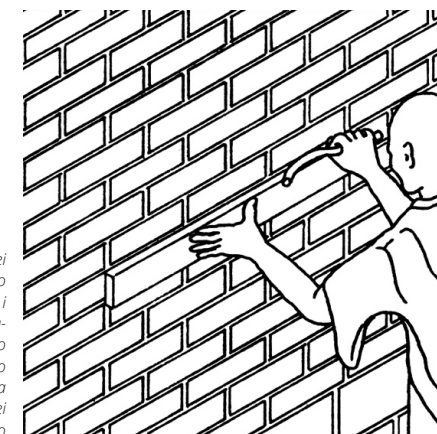
Altri metodi di compressione della terra esistono, alcuni dei quali non prevedono la formazione di mattoni, ma non si ritiene interessante ai fini di questo studio illustrarli in quanto non vengono utilizzati o nella realtà maliana con cui ci si è confrontati.

Questo tipo di mattone è quello con cui è stata realizzata la scuola di tre classi a Dougou-rakoro che è oggetto di questo studio. Si è riscontrato come la manodopera e le maestranze capaci di lavorare con un materiale simile sono meno diffuse rispetto al più semplice mattone Adobe. Questo sia per le maggiori lavorazioni che la produzione del materiale richiede, sia per la cura del dettaglio che spesso risulta necessaria nel costruire un edificio progettato con questo materiale. Se esso rappresenta un'evoluzione a livello tecnico rispetto al mattone Adobe, vero è che la sua diffusione è minore e che si tratta sempre di terra cruda e nell'opinione generale continua ad essere sinonimo di povertà. A sfavore della diffusione di questo materiale gioca un ruolo fondamentale il costo unitario, che risulta sicuramente più elevato di quello del mattone Adobe, ma anche di quello del mattone forato in cemento. Questo fatto si attribuisce alle lavorazioni necessarie per la sua produzione ed alla scarsità di manodopera specializzata nell'uso del mattone CEB.

QUANTITÀ DI CEMENTO PER STABILIZZARE MIX DI TERRA:		
Percentuale di stabilizzante	Volume di cemento per 2 carriere di terra (120 lt.)	Volume di cemento per 3 carriere di terra (180 lt.)
		
4%	5 litri di cemento	7,5 litri di cemento
6%	7,5 litri di cemento	11 litri di cemento
8%	10 litri di cemento	15 litri di cemento
10%	12,5 litri di cemento	18 litri di cemento
12%	15 litri di cemento	22,5 litri di cemento

18.

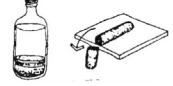
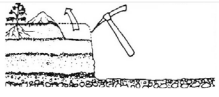


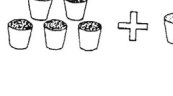


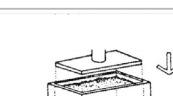
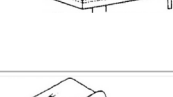
Sopra: Tabella raffigurante la quantità di cemento da aggiungere al mix di terra a seconda della percentuale richiesta. Se, infatti, i sacchi di cemento arrivano in cantiere in sacchi ed il peso del sacco viene usato come riferimento, per quanto riguarda la terra si usa come riferimento la capienza di una carriola (circa 60 litri).



19.

A fianco: svolgimento a regola d'arte dei lavori di posatura dei mattoni in terra compressa. Fra i mattoni viene inserito uno strato di malta (realizzata con la stessa terra utilizzata per i mattoni) dello spessore di 1,5cm. I giunti vengono immediatamente rifiniti come illustrato nel disegno a fianco e testimoniato dalla foto. L'impiego di manodopera specializzata nell'utilizzo dei mattoni CEB risulta, dunque, un criterio fondamentale nella scelta dell'impresa appaltatrice. Le modalità di svolgimento dei lavori ed i mezzi con cui essi dovranno essere svolti vengono chiarite fin da subito tramite l'utilizzo di schemi, disegni e la definizione degli strumenti necessari (in questo caso un tubo di gomma lungo 25cm e con un diametro di 3cm). Per quanto semplici, le lavorazioni in cantiere vengono svolte quasi esclusivamente manualmente e perciò la garanzia di una manodopera preparata e specializzata è essenziale. Per un materiale che richiede una fabbricazione e delle lavorazioni differenti dalle altre tipologie di mattone affrontate, questa ricerca non è così scontata e ciò, unito alla necessità di reperire una pressa che garantisca un livello di produttività e pressione adeguate, rende il mattone CEB più costoso rispetto ad altre scelte.



ATTIVITÀ		DURATA	STRUMENTI	CRITICITÀ
1 Identificazione suolo		1 ora	- Acqua - Bottiglia - Secchio - Stampo	Assicurarsi che il campione sia rappresentativo del sito di estrazione
2 Estrazione		2 ore a m ³	- Piccone - Pala - Carriola - Acqua	Controllare le proprietà del terreno mano mano che si avanza con l'estrazione
3 Essiccazione e frantumazione			- Suolo assorbente - Pala - Zappa - Pestello	Questa operazione è più o meno lunga a seconda dello stato del terreno estratto
4 Setacciatura		2 ore a m ³	- Setaccio - Pala - Suolo pulito	Controllare regolarmente le condizioni del setaccio e non lasciare che il terreno si depositi su di esso
5 Dosaggio		Mix per 20 mattoni: 5 minuti	- Pala - Secchio - Carriola - Dosatore	Verificare il volume dei recipienti ed utilizzare sempre gli stessi
6 Mix a secco		Mix per 20 mattoni: 10 minuti	- Pala - Suolo adatto	Spalare bene per poter eliminare le parti indesiderate. Il colore finale deve essere uniforme
7 Mix umido		Mix per 20 mattoni: 10 minuti	- Pala - Suolo impermeabile - Innaffiatoio	Rispettare le giuste dosi d'acqua ed utilizzare il mix entro 20 minuti
8 Compressione		Da 50 a 100 mattoni per ora	- Pressa manuale - Dosatore - Stampo - Bilancia	Riempire lo stampo sempre con la stessa quantità di terreno ed applicare una forza costante. Verificare regolarmente il peso dei mattoni
9 Cura		Da 10 a 14 giorni	- Telo di plastica - Superficie piana	Assicurarsi che non ci siano fori dai quali può passare l'aria e segnare la data di fabbricazione sui blocchi

20.

Tabella con l'elenco delle lavorazioni necessarie per la produzione di mattoni CEB. Nel documento di appalto vengono indicate anche le tempistiche, gli strumenti necessari e le criticità per ogni fase, alle quali occorre prestare particolare attenzione.

La totalità delle lavorazioni necessarie alla produzione di mattoni CEB viene svolta manualmente e le operazioni di dosaggio, miscelatura, compressione e cura vengono svolte in cantiere, che viene dotato di uno spazio apposito. La terra cruda che viene estratta viene esaminata con dei rapidi test per capire se siano necessarie eventuali aggiunte per ottenere il mix ideale per la fabbricazione di mattoni CEB. La composizione della terra estratta varia anche con la profondità che si raggiunge ed è strettamente legata alle caratteristiche fisiche del luogo. In ogni caso, quando si utilizza della terra per la creazione di mattoni compressi, questa proviene da luoghi in prossimità del sito di produzione. Questo comporta una minore distanza di trasporto ed un conseguente contenimento delle emissioni legate a questa fase.

Introducendo questo studio si è anche fatto riferimento ai mattoni in terra cotti in fornaci. Questa è una soluzione ottimale per quanto riguarda il problema della resistenza all'acqua della terra cruda ma la diffusione di questo materiale è limitata per diverse ragioni. Il combustibile utilizzato nelle fornaci è legno o suoi derivati come il carbone e in una zona semi-desertica questo comporta un alto costo del combustibile e quindi del prodotto finale, nonché un danno ambientale dovuto all'abbattimento incontrollato di alberi in queste zone che, combinato al surriscaldamento globale, causa un veloce avanzamento del fenomeno della desertificazione. Un altro fattore che limita fortemente la diffusione dei mattoni in terra cotta è la realtà centralizzata che caratterizza la loro produzione e la loro vendita. L'economia maliana si basa, infatti, principalmente su rapporti informali e quando la produzione di materiale non avviene direttamente in cantiere, questi vengono acquistati direttamente lungo la strada, dove si trovano spesso e volentieri gruppi di persone dediti alla fabbricazione di mattoni. Il fatto di avere una produzione ed un sistema di vendite centralizzato ed orbitante attorno alla fornace, unito al costo elevato di questo materiale, frena estremamente la diffusione di questo materiale.

21.

A fianco: immagine della fornace di Bamako. Qui i mattoni vengono fabbricati, cotti e venduti in una realtà meno informale di quella che caratterizza la compravendita degli altri tipi di mattone, sia in terra che in cemento. Questo, unito al costo elevato, ne limita la diffusione.



22.

A fianco: mattoni cotti in fornace e stoccati pronti per la vendita. L'utilizzo di questo tipo di mattoni per la costruzione di edifici, abitazioni in particolare, viene visto come sinonimo di appartenenza ad un ceto sociale medio. Rispetto alla terra cruda, infatti, il mattone cotto è collegato ad un edificio più duraturo ed il materiale è inteso come meno povero rispetto alla terra cruda.



IL MATTONE CHB

A causa della scarsissima resistenza all'acqua del mattone Adobe ed alla conseguente manutenzione necessaria per preservarlo, dato il costo elevato del mattone CEB e la non scontata reperibilità di conoscenze e presse per produrre questo materiale ed appurata la scarsa predisposizione all'uso di una realtà centralizzata per la compravendita di mattoni, negli ultimi decenni il materiale che più è andato a soddisfare e supportare la crescente domanda abitativa e che ha prepotentemente sostituito l'utilizzo dei materiali tradizionali, è il mattone forato in cemento (Concrete Hollow Block), chiamato localmente "parpaing" o "dur". La semplicità di produzione, la sua resistenza all'acqua, il fatto che non necessiti di particolare manutenzione, il basso costo dovuto alla scarsa quantità di materiale utilizzato per produrlo, nonché il collegamento ad un edificio che rispecchi, erroneamente, un'architettura efficiente e curata, favoriscono tutt'ora la diffusione di questo materiale e l'uso è spesso sinonimo di ricchezza e di benessere.

Data la disponibilità degli elementi che compongono i mattoni forati in cemento e la loro semplicità di fabbricazione, questa è un'attività lavorativa abbastanza diffusa a livello locale. Risulta, infatti, sufficiente dosare le quantità di sabbia e ghiaia da mescolare al cemento che, essendo comprato in sacchi dal peso specificato, viene usato come riferimento. Il rapporto che si usa è di 3 parti di sabbia e 5 di ghiaia per ogni parte di cemento o, più in generale, 8 parti di aggregati per ogni parte di cemento. Gli elementi vengono mischiati tramite l'utilizzo di strumenti manuali (come pale e badili) fino ad ottenere un composto omogeneo che viene inumidito e posto all'interno di stampi che restituiscono un mattone forato. Le dimensioni tipiche di questi elementi sono di 20x20x40cm o di 15x20x45cm ed uno strato di malta di circa 1,5 cm viene inserito fra un mattone e l'altro. Questo tipo di mattoni viene utilizzato come tamponamento in strutture a telaio in calcestruzzo armato, o più raramente viene creata una muratura armata tramite l'inserimento di pilastri e cordoli.

Pur essendo utilizzati anche per costruzioni di grandi dimensioni, come edifici pubblici o grandi abitazioni, anche per questa tipologia di mattoni la produzione è frequentemente localizzata in uno spazio apposito del cantiere o comunque nelle sue vicinanze.



23.

Sopra: operaio addetto alla fabbricazione di mattoni CHB provvede all'umidificazione dei mattoni durante la fase di essiccazione. Come per il BTC, questo passaggio è fondamentale per evitare fessurazioni dei mattoni durante questa fase. Sullo sfondo si possono notare mattoni già stoccati e pronti all'uso e l'edificio in costruzione per il quale i mattoni saranno utilizzati. (Photo credits to Michele Cattani)

24.

A fianco: Esempi di edifici in corso di realizzazione con mattoni forati in cemento (CHB). Si può notare la differenza a livello di qualità di progettazione e costruzione fra i due casi. Spesso, vista la semplicità con cui il materiale viene prodotto, anche la progettazione e la costruzione sono affrontate in maniera semplicistica, portando alla realizzazione di edifici che risultano essere fatiscenti ed inadatti all'abitabilità già prima di essere ultimati. Questo si va a sommare alle già scarse prestazioni energetiche garantite dai mattoni CHB, i quali vengono erroneamente ritenuti migliori anche da un punto di vista del comfort garantito all'interno degli spazi. Come evidenziato nel capitolo introduttivo, questo fattore culturale non può essere non considerato quando si parla e si confrontano materiali come i mattoni in terra cruda e quelli in cemento.



25.

Sotto: veduta aerea di un sito di fabbricazione e stoccaggio di mattoni CHB forati in cemento. La crescente domanda abitativa (soprattutto nel distretto di Bamako) viene principalmente soddisfatta attraverso l'utilizzo di questo materiale. (Photo credits to Michele Cattani)



Parlando di questa tipologia di mattoni non ci si può non ricollegare a quanto detto nel capitolo precedente. Se, infatti, la produzione di mattoni CHB risulta semplice, economica e va a supportare la domanda abitativa che sostiene da decenni il settore edilizio maliano, la crescita economica è frenata dal fatto che la stragrande maggioranza del cemento utilizzato nelle costruzioni e quindi anche nella produzione di mattoni forati venga importato dal confinante Senegal, nonostante la presenza di almeno tre cementifici in Mali. Questo rende il prezzo del cemento oggetto di frequenti oscillazioni dovute all'instabilità geopolitica dell'area, fattore che limita ulteriormente la sostenibilità economica dell'uso di questo materiale.

Si ritiene utile sottolineare, visto il carattere ambientale dell'analisi che seguirà, come la parte di aggregato sabbiosa utilizzata per la produzione di questi mattoni venga estratta manualmente dal fiume Niger. Questo tipo di sabbia, infatti, risulta migliore in quanto a forma rispetto a quella facilmente reperibile in tutto il paese e proveniente dal deserto del Sahara. Questa richiesta sempre crescente di sabbia dalle migliori qualità (la forma della sabbia proveniente dal deserto risulta troppo poco spigolosa per un uso efficace nel settore edilizio) sta portando al rapido deterioramento di un ecosistema, quello del fiume Niger, assolutamente fondamentale per la sopravvivenza degli abitanti e per l'economia dello stato maliano. Anche queste operazioni di estrazione vengono effettuate in modo manuale e spesso i lavoratori si trovano ad agire in condizioni inaccettabili. Il vasto utilizzo di sabbia proveniente dal fiume Niger è testimoniato dalla presenza di grandi cumuli di sabbia caratterizzati da un colore giallastro differente da quello della sabbia proveniente dal deserto. Oltre ad un danno ambientale, la limitatezza ed il rapido esaurimento di questa risorsa si prevede possa anche andare a compromettere un'attività che garantisce sostentamento ed occupazione a grande parte della popolazione, coinvolgendola in maniera eterogenea a diversi livelli.

26.

Sotto: pescatori di sabbia lungo il fiume Niger. Spesso costretti a condizioni di lavoro inaccettabili ed usando di semplici secchi, questi uomini si immergono e provvedono all'estrazione della sabbia che verrà in seguito usata come aggregato, principalmente per il calcestruzzo armato e per la fabbricazione di mattoni forati in cemento. (Photo credits to Michele Cattani)



27.

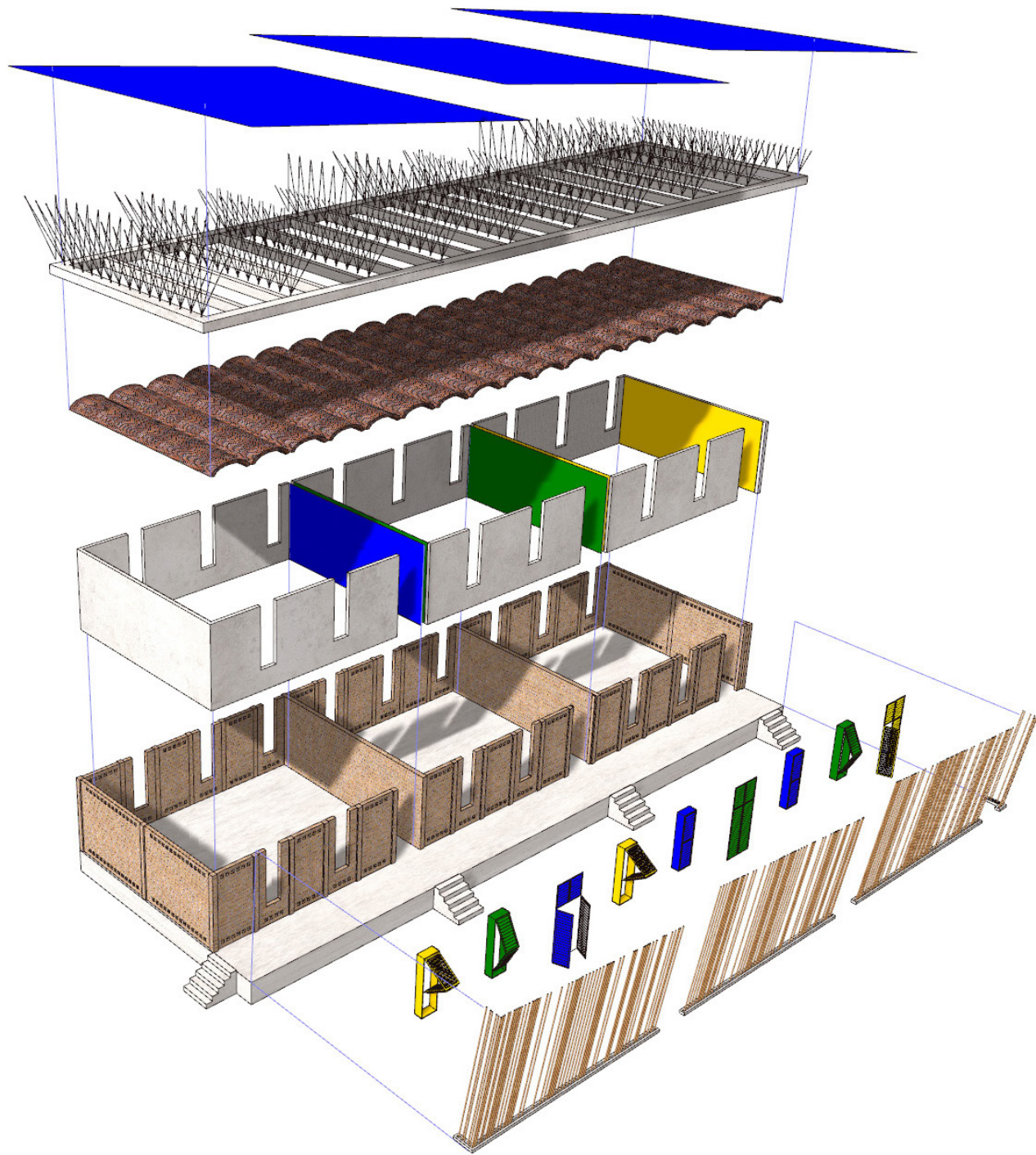
A fianco: una volta estratta e caricata su delle piroghe, la sabbia viene trasportata ai punti di raccolta, dove viene scaricata e stoccata in cumuli. (Photo credits to Michele Cattani)



28.

Sotto: veduta aerea di un punto di attracco delle piroghe. Dopo essere stata scaricata la sabbia viene caricata su camion che provvedono al trasporto fino al sito di produzione, che il più delle volte coincide col cantiere. Queste attività coinvolgono tutte le fasce di popolazione, dagli adulti ai bambini di entrambi i sessi, che provvedono al loro sostentamento con le attività di estrazione e vendita della sabbia. (Photo credits to Michele Cattani)





3.

CASO DI STUDIO: KALAN DEME SO

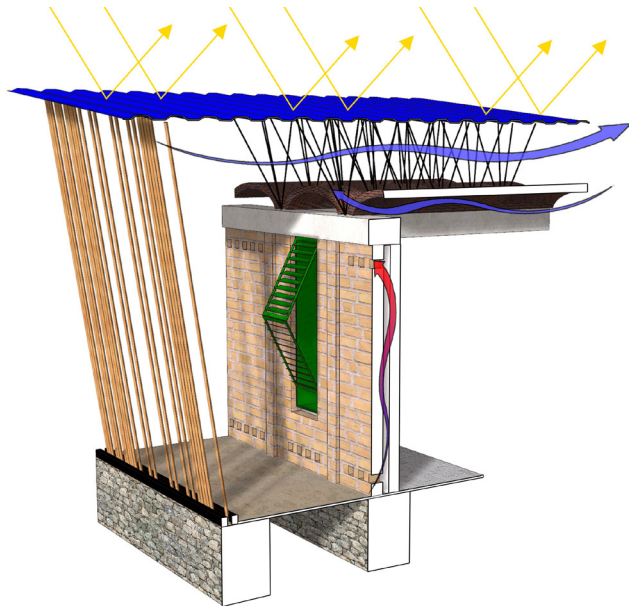
*.Progettazione bioclimatica
.Il contributo del cemento
.L'edificio finale*

All'interno del contesto generale che si è introdotto, si cala la progettazione e la realizzazione di una scuola di tre classi a Dougourakoro, progettata secondo criteri bioclimatici e costruita con mattoni compressi in terra cruda (CEB). Attraverso l'uso della terra, largamente disponibile nei dintorni, ci si focalizza sulla comunità locale, ambendo a gettare le basi per sviluppare nuove e durature competenze tecnologiche, così da abbassare il grado di dipendenza da interventi e materiali esterni. L'utilizzo di mattoni CEB si crede possa aiutare ad abbattere la barriera sociale che maggiormente frena l'utilizzo di tecniche costruttive in terra e che contribuisce alla diffusione dell'uso del mattone in cemento come materiale per rivendicare ricchezza e sviluppo. Attraverso l'utilizzo dei mattoni in terra pressata e ad un coinvolgimento della comunità locale nel processo di costruzione dell'edificio si mostra come le tecniche tradizionali, che caratterizzano il patrimonio storico e culturale del Mali, possano essere modernizzate per adattarsi ai nostri tempi. Con l'intento di garantire uno sviluppo sostenibile ed una nuova accettazione del materiale il progettista ha dovuto trovare un linguaggio architettonico contemporaneo ed accattivante, nel quale la collettività si possa identificare più facilmente di quanto non abbiano fatto con grossolani tentativi di imitazione di stili europei o nord americani. A fronte di un maggiore costo di costruzione, il design bioclimatico e le caratteristiche della terra cruda garantiscono un maggiore comfort termico che permette di ridurre al minimo l'uso di impianti di raffrescamento, a supporto di una maggiore sostenibilità ambientale dell'edificio e di minori costi di gestione dell'intera scuola.

PROGETTAZIONE BIOCLIMATICA

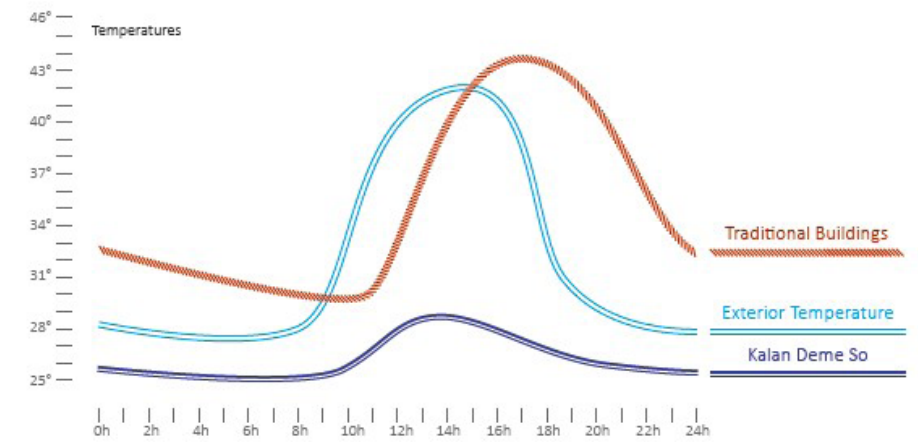
Il progetto Kalan Deme So si propone di perseguire uno sviluppo sostenibile e per questo motivo i tre aspetti fondamentali del concetto di sostenibilità vengono inclusi nella sua progettazione: una rinnovata accettazione sociale del materiale terra cruda, perseguita attraverso un coinvolgimento attivo della comunità nella produzione a livello locale del materiale, nella costruzione dell'edificio e nella sua gestione, un contenimento delle emissioni ambientali legate all'intero ciclo di vita, legato all'uso dei mattoni CEB ed al design bioclimatico che permette, inoltre, un abbattimento dei costi di gestione e di uso, grazie all'assenza di impianti di raffrescamento che risulterebbero inefficienti.

Con questi obiettivi ben chiari, l'architetto ha progettato una parete ventilata, così da riuscire ad isolare il più possibile gli ambienti interni da quello esterno, caratterizzato da temperature particolarmente elevate durante la maggior parte dell'anno e diverse aperture sono presenti lungo le due facciate principali, così da favorire il ricircolo dell'aria e ricercare un raffrescamento passivo. Particolare attenzione è stata riservata alla progettazione della copertura: la soluzione tipica adottata a livello locale prevede il posizionamento di una lamiera grecata a copertura dell'edificio che viene eventualmente dotato di controsoffitti interni e risulta essere inadatta al clima semi desertico del Mali, contribuendo fortemente a rendere gli ambienti interni degli edifici poco confortevoli. Il calore viene, infatti, assorbito dalla lamiera grecata e trasmesso direttamente all'interno degli ambienti senza alcun filtro o barriera. Non è difficile imbattersi in costruzioni sui cui tetti sono stati accumulati i più svariati materiali, per fare in modo che la lamiera non sia a diretto contatto col sole. Queste soluzioni sono temporanee ed inefficienti, così come lo sono gli impianti di raffrescamento che vengono frequentemente installati e che, in assenza di un adeguato dimensionamento e di un corretto isolamento, risultano apportare un beneficio limitato a fronte di un elevato consumo di energia. La lamiera di copertura viene, dunque, sollevata rispetto agli spazi interni, coperti da piccole volte, in modo da proteggerli dalla pioggia ma anche da permettere il passaggio dell'aria che permette così di garantire una corretta ventilazione dello spazio ed un maggiore comfort interno.



29.

A fianco: dettaglio rappresentante le soluzioni bioclimatiche adottate nel progetto Kalan Deme So per raggiungere un migliore comfort termico interno minimizzando le emissioni dovute all'uso di impianti di raffrescamento. Attraverso l'utilizzo di mattoni in terra compressa per creare una doppia parete ventilata, gli ambienti interni sono maggiormente isolati rispetto all'esterno e le caratteristiche del materiale garantiscono ottime prestazioni per quanto riguarda la trasmissione del calore in regime non stazionario. In copertura, la lamiera grecata viene sollevata per risultare ventilata ed è ancorata tramite profili metallici ad una serie di piccole volte che provvedono ad un'ulteriore ventilazione passiva.



30.

Sopra: grafico illustrante la temperatura media esterna per ora, la temperatura interna degli edifici costruiti in mattoni forati in cemento e senza alcun accorgimento bioclimatico ed infine la temperatura media per ora attesa all'interno della scuola di Dougourakoro.

31.

Sotto: vista durante la costruzione dell'edificio. Si possono notare le aperture e le volte, in mattoni CEB e supportate da travi IPE20, che garantiscono un comfort interno e caratterizzano l'edificio con un linguaggio architettonico ben definito.



IL CONTRIBUTO DEL CEMENTO

Tutto l'edificio viene costruito su di un basamento di 1 metro di altezza, che provvede ad evitare l'allagamento degli spazi interni durante la stagione delle piogge che caratterizza queste zone nel periodo fra giugno e settembre. La scarsa urbanizzazione e la portata delle precipitazioni in questa stagione, rendono necessarie soluzioni di questo tipo, in particolare con edifici in terra. Il basamento è stato realizzato con mattoni forati in cemento ed era già presente quando all'architetto è stato commissionato il progetto. Una possibile soluzione alternativa sarebbe potuta essere la pietra che, come per le pavimentazioni, può essere estratta localmente.

Il problema della resistenza all'acqua e del contenimento dei danni provocanti dagli annuali allagamenti è di primaria importanza ed è sicuramente uno dei principali elementi che hanno portato alla rapida diffusione del mattone forato in cemento (CHB). In questo caso specifico, su consiglio dello studio ingegneristico locale, si è andati a stabilizzare i mattoni in terra aggiungendo una percentuale di cemento al mix pari al 6%. Documentandosi ed affrontando il tema della riduzione al minimo dell'uso di cemento, si è optato per la soluzione della stabilizzazione anche per una questione strutturale: la stabilizzazione del mattone con una percentuale di cemento, infatti, comporta un miglioramento delle prestazioni meccaniche del mattone e, anche in previsione di un eventuale innalzamento dell'edificio, il progettista ha ritenuto opportuno scegliere questa soluzione per avere una struttura in muratura solida, durevole e resistente. A conferma di quanto detto in precedenza e di quanto intuito durante l'esperienza sul campo, però, una volta arrivati a definire i dettagli strutturali del progetto, è stato inserito un sistema a telaio in calcestruzzo armato che assolvesse le funzioni strutturali. Chiedendo delucidazioni al riguardo e confrontandosi nuovamente con gli ingegneri locali, è risultato chiaro come, nonostante l'unità di intenti riguardo alla ricerca di uno sviluppo sostenibile e di una nuova accettazione sociale della terra come materiale da costruzione, la fiducia e le competenze locali riguardanti questo materiale non sono ancora sufficienti. La muratura, in questo modo, viene declassata a semplice tamponamento e si evidenzia un altro aspetto, legato alla mancanza di competenze su questo materiale che ne compromette la diffusione anche quando il suo utilizzo può essere accettato socialmente dalla comunità locale coinvolta.



32.

A fianco: fase di posa delle travi IPE al cantiere di Dougourakoro. Si può chiaramente notare la presenza di cordolo e pilastri in calcestruzzo armato che vanno ad armare puntualmente la muratura, alla quale non si assegna completamente la funzione strutturale, data la scarsa fiducia dovuta alle limitate conoscenze al riguardo. Diverse associazioni hanno intrapreso e pubblicizzano diverse iniziative e programmi a supporto di una maggiore diffusione delle competenze fra i professionisti riguardanti l'utilizzo della terra cruda, così da porre le basi per una progettazione di qualità a supporto della diffusione di questo materiale.

33.

A fianco: basamento predisposto per evitare l'allagamento dell'edificio. Il progetto originale dell'edificio era stato progettato in mattoni forati in cemento, in quanto il committente non era a conoscenza della possibilità di utilizzare la terra cruda e si era già proceduti alla costruzione del basamento. In seguito al cambiamento di materiale, alcune lavorazioni sono state svolte per modificare le fondazioni ed adeguarle alla nuova muratura ventilata, che risulta avere uno spessore di 40cm invece che di 20cm come quella in mattoni CHB.



34.

Sopra: dettagli della costruzione dell'edificio ed in particolare dell'installazione delle cassette per la colatura dei pilastri e del cordolo superiore. In questo modo la muratura diventa un tamponamento e perde la funzione strutturale.





35.

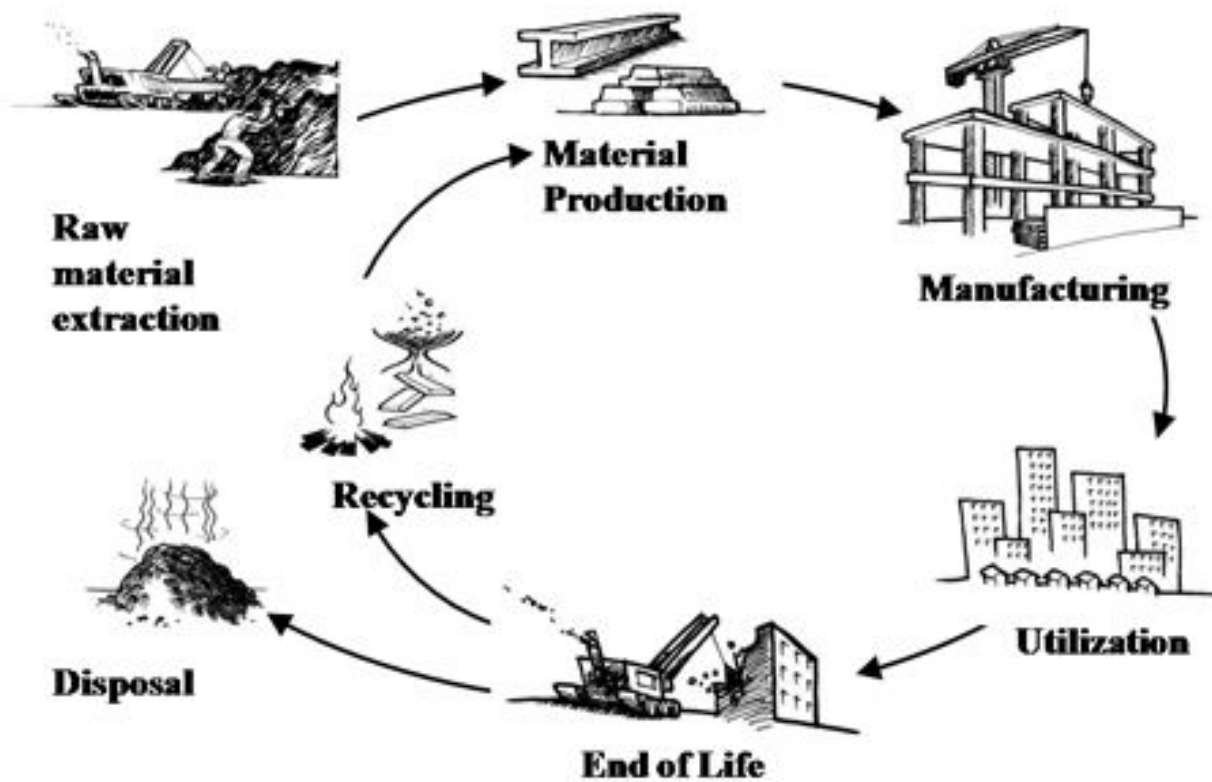
*Sopra: vista della scuola Kalan Deme
 So durante le fasi di rifinitura*

Dopo una serie di imprevisti e compromessi si è ultimata la costruzione della scuola. Il risultato finale è sicuramente un edificio che è fortemente caratterizzato dall'uso del mattone in terra compresso, che viene messo bene in risalto dall'assenza di intonaci e dalla tipica colorazione rossastra della terra locale. Le colorazioni degli interni e di porte e finestre vanno a contraddistinguere ulteriormente l'edificio e le diverse classi e l'utilizzo della lamiera grecata come sorta di copertura ventilata consente di mostrare le piccole volte in mattoni che scandiscono lo spazio e definiscono un chiaro linguaggio architettonico. Si pensa, dunque, di avere seguito le indicazioni derivanti dalla conoscenza dei diversi materiali e soprattutto dal confronto con diversi professionisti esperti nel campo della sostenibilità

nella zona sahariana. Detto ciò, non si hanno i mezzi per verificare in maniera immediata gli effetti e l'accettazione sociale che questo edificio avrà. Ciò che si ritiene corretto ed è possibile fare, è quantificare e verificare nel modo migliore gli altri aspetti che formano la sostenibilità: quello economico e quello ambientale, con particolare interesse e cura per quest'ultimo. Nei capitoli che seguono, dunque, verranno analizzati questi aspetti che, come detto, non possono prescindere dalle considerazioni fino a qui fatte, le quali guideranno le conclusioni finali che saranno tratte dai risultati ottenuti.

4.

LO STRUMENTO: LIFE CYCLE ASSESSMENT



*.Struttura LCA
.Goal &Scope
.Confini del sistema
.Unità funzionale
.Raccolta dati
.Categorie d'impatto
.Interpretazione*

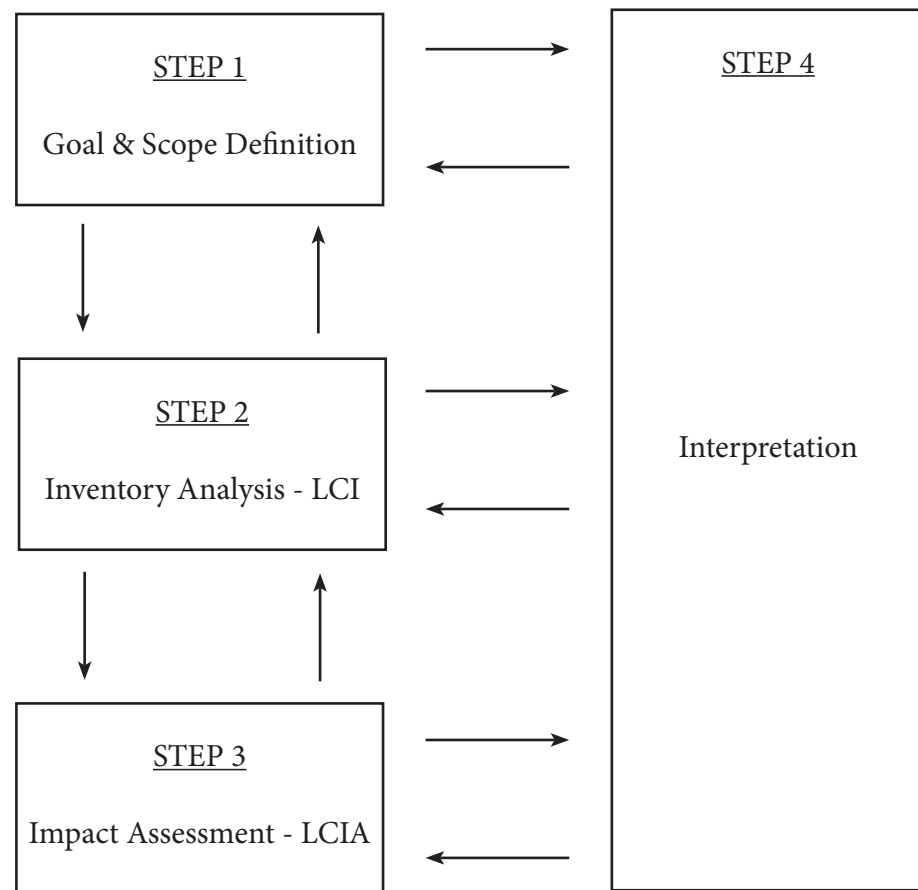
In base a quanto detto fino ad ora e con l'obiettivo di quantificare e verificare la maggiore propensione a favorire uno sviluppo sostenibile del materiale terra cruda, si procede alla presentazione della metodologia ritenuta migliore e più valida per la valutazione della sostenibilità ambientale. Si è, infatti, utilizzata un'analisi LCA (Life Cycle Assessment) per quantificare le emissioni durante l'intero ciclo di vita dell'edificio adottato come caso di studio e si sono confrontate con le emissioni associate ad un ipotetico edificio situato nella medesima località, con uguale funzione e dimensioni ma realizzato con i mattoni forati in cemento e senza essere caratterizzato da una progettazione bioclimatica. Si è, dunque, andati a confrontare quella che è la maniera più diffusa di costruire in Mali, specialmente nella zona di Bamako, con quella che si pensa possa diventare un nuovo paradigma, maggiormente legato alla tradizione ed alle tecniche tradizionali del luogo, ma che inserisca anche alcuni elementi innovativi che possano stimolare uno sviluppo sostenibile della realtà maliana. Se la sostenibilità ambientale della terra cruda è data per scontata in confronto all'utilizzo di un materiale in cui è presente una buona percentuale di cemento, la differenza nella progettazione fra i due edifici inserisce un'incertezza legata alla quantità di materiale utilizzata e risulta, perciò, utile approfondire questa parte di studio, oltre che per quantificare le emissioni del singolo edificio bioclimatico per avere dati certi sull'entità delle sue emissioni e capire fino a che punto sia possibile ambire ad arrivare avendo a disposizione risorse limitate in una realtà profondamente diversa da quella con cui, chi scrive, si è sempre misurato.

La valutazione del ciclo di vita (LCA) rappresenta una metodologia completa per l'analisi degli impatti ambientali dei prodotti, definiti anche come sistemi, a tutti i livelli del loro ciclo di vita, dalla culla alla tomba e successivamente, quando viene incluso anche il riciclaggio, dalla culla alla culla. Pertanto la LCA comporta la valutazione degli impatti ambientali di un prodotto (in questo caso un intero edificio), guardando al suo intero ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime allo smaltimento, fino al riciclaggio.

Come riferimento per la corretta applicazione dell'analisi vengono prese le norme della serie EN ISO 14040, che ne definiscono i principi ed il quadro di riferimento e che individuano quattro fasi fondamentali:

- la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi;
- la fase di inventario del ciclo di vita (Life Cycle Inventory);
- la fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (Life Cycle Impact Assessment);
- la fase di interpretazione del ciclo di vita (Life Cycle Interpretation).

La ricerca e l'analisi presentate in questo elaborato sono state svolte seguendo le indicazioni della normativa e, pertanto, rispecchiano le fasi indicate.



36.

Sopra: grafico rappresentante le fasi che strutturano un metodo LCA. (ISO 14040)

La prima fase di una LCA consiste nel definire e descrivere chiaramente l'obiettivo e le finalità dello studio. Come già accennato nel corso di questo elaborato, si è condotta una valutazione del ciclo di vita (LCA) di un edificio in mattoni di terra compressa, adottato come caso di studio e realmente esistente, per potere quantificare le emissioni e valutare la sostenibilità ambientale del materiale terra cruda utilizzato in questo specifico modo, confrontando queste emissioni con quelle attribuite ad un edificio che si ipotizza realizzato nel medesimo luogo con una tecnologia che utilizza mattoni forati in cemento. Oltre che alla differenza di materiale, si vuole includere nell'analisi anche la differenza a livello di progettazione fra i due edifici considerati. Se da una parte si ha un edificio che adotta soluzioni bioclimatiche, dall'altra si ipotizza un edificio che presenta le soluzioni costruttive maggiormente diffuse in Mali: parete singola con mattoni forati in cemento a fare da tamponamento ad un telaio in calcestruzzo armato. Si ipotizza la presenza diintonaci di rivestimento e di una lamiera di copertura appoggiata all'edificio, sotto cui viene installato un controsoffitto in cartongesso. La scelta di comparare l'edificio costruito con un edificio come quello appena illustrato deriva dal fatto che, se la sostenibilità del materiale terra cruda rispetto al cemento si dà per scontata, così come le migliori prestazioni energetiche del materiale, la maggiore sostenibilità ambientale di un edificio con le caratteristiche di Kalan Deme So non risulta immediata rispetto ad un edificio che, grazie a differenti soluzioni progettuali, comporta minori quantitativi di materiale utilizzato.

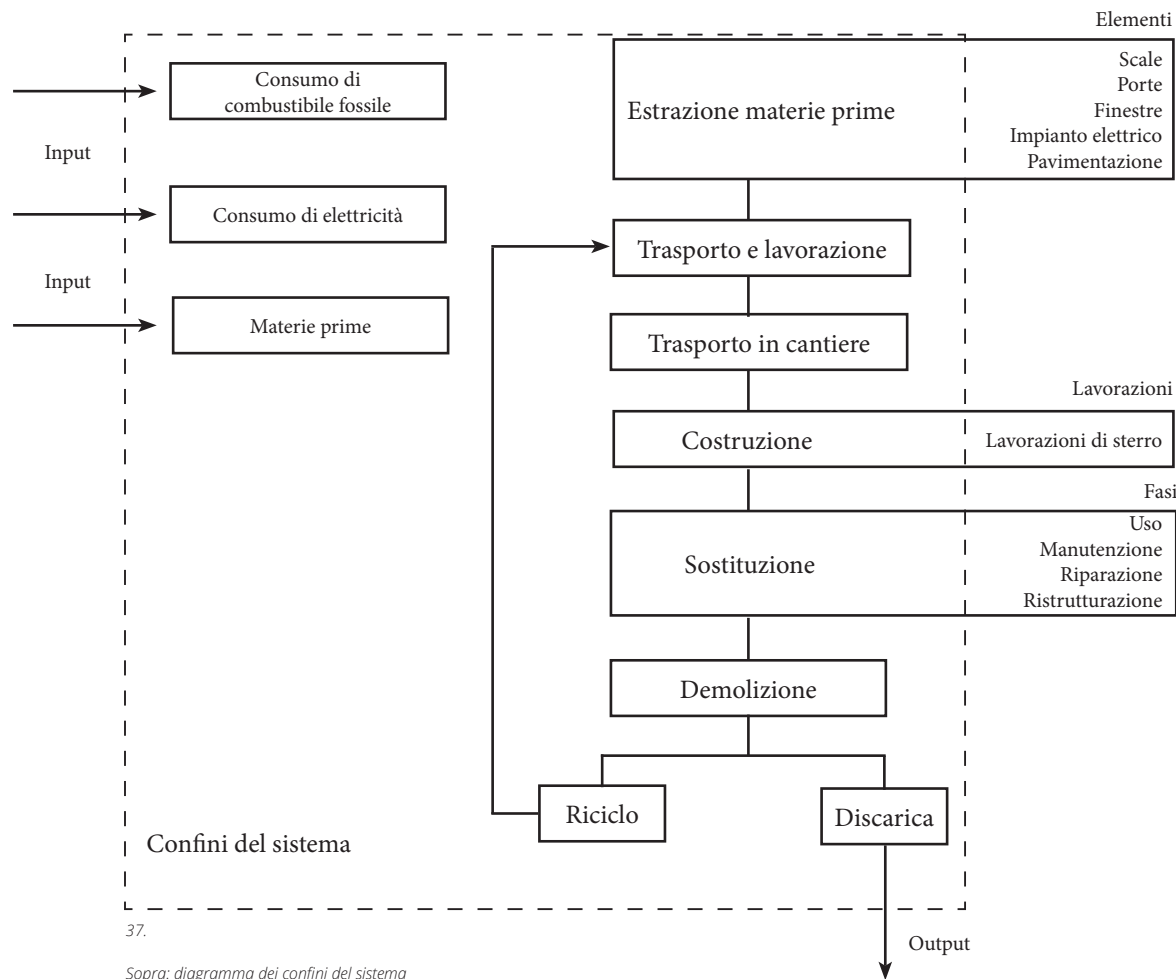
Attraverso questo studio si vuole, quindi, quantificare le emissioni ambientali dei due edifici durante il loro ciclo di vita, così da verificare e misurare la sostenibilità di uno rispetto all'altro.

La scelta di questo metodo è stata anche fatta per provare a verificare la validità di un metodo come la Life Cycle Assessment all'interno di un contesto che non rispecchia esattamente quello per il quale questo tipo di studio è stato creato. Si ritiene questa metodologia particolarmente adatta ad essere modellata su contesti differenti ed andare a fornire indicazioni e risultati affidabili in base alle ipotesi fatte.

Ultimo aspetto che ha portato alla scelta di una valutazione LCA è la volontà di poter affiancare, in futuro, altri studi sulla sostenibilità del ciclo di vita dell'edificio costruito, sia a livello economico che sociale.

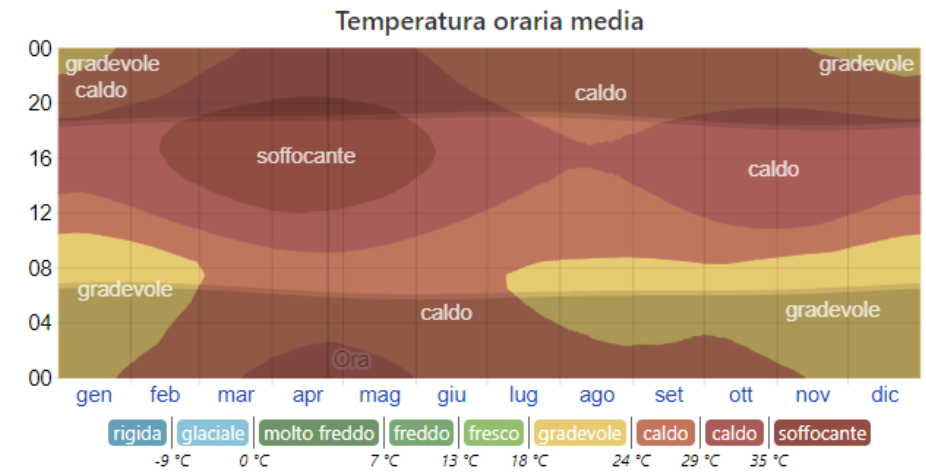
Alla definizione di questi obiettivi si è arrivati tramite il confronto immediato fra le prestazioni dei due differenti materiali e delle diverse soluzioni progettuali: se, infatti, un edificio in terra a parete singola non garantisce il comfort interno necessario (oltre che essere difficilmente accettato per i motivi precedentemente esposti), risulta che anche un edificio costruito in mattoni forati in cemento seguendo una progettazione bioclimatica non arriva ad avere le prestazioni energetiche del suo corrispettivo in terra (oltre ad essere una soluzione che non viene mai utilizzata a livello locale). In seguito a queste considerazioni risulta sensato comparare gli edifici che vengono considerati in questo studio, andando a ricercare i risultati che corrispondano allo scopo ed alle finalità che ci si è posti.

Durante questa fase iniziale dello studio, vengono definiti i confini del sistema, che regolano e rappresentano l'insieme dei processi inclusi o meno nello studio LCA. All'interno del sistema vengono considerati tutti quei meccanismi aventi una determinata funzione e che risultano avere una serie di scambi di input ed output col sistema ambiente situato all'esterno dei confini. Si sono escluse dall'analisi e sono quindi state considerate fuori dai confini, tutte quelle parti che si ipotizzano comuni ai due edifici analizzati, come porte, finestre, impianti elettrici per l'illuminazione ed eventuali scale e, più in generale, tutti quegli elementi, quelle lavorazioni e quelle fasi che non sono condizionati dal cambiamento del tipo di materiale utilizzato o che si ipotizzano influire in maniera uguale sui risultati delle due analisi e che, dunque, non apportano variazioni di emissione rilevanti per lo scopo e la finalità dell'analisi condotta. Lo scopo è, infatti, quello di comparare fra loro due differenti materiali, ciascuno dei quali si ritiene sia associato ad un certo tipo di progettazione. A tal fine non si crede sia importante raggiungere un risultato assoluto con una massima precisione, ma ci si concentra sulle differenze maggiori fra le due tipologie. I risultati finali, perciò, non saranno quelli assoluti relativi ad ogni edificio, ma saranno da interpretare come relativi ai materiali utilizzati e alle soluzioni progettuali a loro associate e con un fine comparativo fra questi.



38.

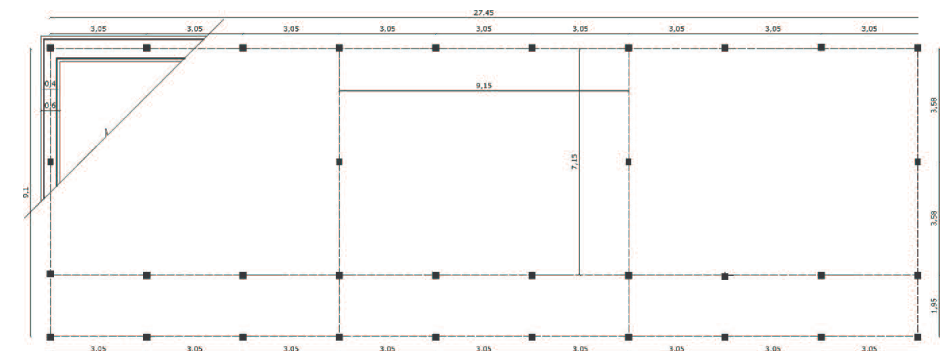
A fianco: grafico rappresentante la temperatura oraria media di Bamako, con fasce diverse di colori. L'ombreggiatura indica la notte ed il crepuscolo civile.



Insieme ai confini del sistema è necessario stabilire l'unità funzionale, cioè la misura del sistema studiato, intesa come misura unitaria della prestazione quantificabile del sistema analizzato. L'unità funzionale deve essere definita accuratamente considerando le diverse funzioni ed i requisiti dell'edificio in esame. Volendo tenere conto sia del materiale utilizzato per la costruzione, che delle soluzioni bioclimatiche che caratterizzano l'edificio analizzato, si è scelto un requisito spaziale, riferendosi alle dimensioni effettive dell'edificio, il quale è formato da tre classi di 9x7 metri, per un totale di 63 metri quadrati, per un'altezza di 3,3 metri. A queste dimensioni è da si aggiunge una veranda di 1,9 metri che permette l'accesso alle classi. Per tenere in considerazione il design bioclimatico, che si ritiene indispensabile per il raggiungimento della sostenibilità ambientale ed economica, viene stabilito un criterio energetico, secondo il quale viene deciso di considerare una temperatura interna di 26°C. In questo modo si va a tenere conto dell'eventuale risparmio energetico che un determinato modo di progettare comporta. Dal momento che le temperature esterne risultano spesso molto alte, il comfort e la vivibilità degli spazi risultano fortemente compromessi e per questo motivo nella maggior parte degli edifici, in particolare quelli pubblici, gli uffici, le scuole e gli ospedali, vengono installati impianti di condizionamento che risultano altamente energivori. La combinazione di un requisito spaziale e di uno energetico si crede possa garantire la comparabilità fra i due diversi edifici per arrivare a trarre conclusioni coerenti con la realtà e che diano informazioni riguardo alla sostenibilità dell'utilizzo della terra cruda come materiale da costruzione.

39.

A fianco: pianta rappresentante le dimensioni scelte per l'unità funzionale. Un blocco di tre classi da 63 metri quadri ciascuna, con una veranda di 1,9 metri. Le aule sono alte 3,3m.



Il secondo passo, l'inventario del ciclo di vita (LCI), si occupa del recupero dei dati da database, fornendo le emissioni relative ad ogni unità di processo che compone il sistema. La raccolta dati per la creazione di un database per questo studio è stata eseguita in maniera autonoma, raccogliendo dati dalle risorse gratuite che si sono trovate durante la fase di ricerca. Ci si è affidati, in particolare, a diverse EPD (Environmental Product Declaration) dei materiali da costruzione considerati all'interno dello studio. Una EPD è un documento che raccoglie le informazioni riguardanti l'impatto ambientale del prodotto durante il suo ciclo di vita e che rappresenta la base per la creazione dell'inventario dati di questo LCA. Data la totale assenza di informazioni gratuite riguardanti il Mali ed i materiali prodotti ed utilizzati, sono stati ricercati e presi in considerazione quei certificati che maggiormente si potessero avvicinare ad uno scenario simile a quello maliano e che fossero caratterizzati dalla gratuità del loro utilizzo. Si è cercato, dunque, di non prendere in considerazione quegli EPD che evidenziassero un particolare avanzamento tecnologico o una produzione nord europea o americana dei materiali, mentre la scelta è ricaduta su quelli che si è ritenuto potessero maggiormente avvicinarsi alla realtà, sia come lavorazioni che come provenienza dei materiali. I dati raccolti dagli EPD sono stati organizzati e normalizzati in fogli di dati attraverso l'utilizzo del software Microsoft Excel, così da risultare pienamente fruibili. Si è arrivati, quindi, ad avere le emissioni relative ad ogni materiale durante il proprio ciclo di vita che, a seconda delle categorie d'impatto incluse nello studio, permettono di quantificare gli input e gli output di materiali ed energia del sistema dell'edificio.

La terza fase, di valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA), valuta l'impatto dei risultati dell'LCI su ogni fase del ciclo di vita. Essa comporta la selezione delle categorie di impatto, degli indicatori e dei modelli di caratterizzazione. Le categorie d'impatto sono selezionate e definite in funzione dell'obiettivo e delle finalità. Esse sono espresse in relazione ad uno standard, di solito basato sull'emissione più importante che causa l'effetto. Tutti gli altri inquinanti e le emissioni sono espressi come quantità equivalente delle emissioni di riferimento: ad esempio il Global Warming Potential è causato principalmente dalla CO2 e quindi espresso in tonnellate di CO2-equivalente. Ogni tonnellata di Metano (CH4) corrisponde a 84 Kg di CO2e (equivalente).

Le categorie d'impatto che si è scelto di considerare sono quelle tipiche della valutazione LCA: potenziale di riscaldamento globale, riduzione dello strato di ozono nella stratosfera, acidificazione del terreno e risorse d'acqua ed eutrofizzazione. A queste si sono aggiunte altre categorie ritenute di particolare interesse considerata la scarsità di risorse ed il clima della zona in cui lo studio si cala. Sono state, dunque, considerate anche il potenziale di esaurimento delle risorse fossili e non ed il consumo di acqua. Queste categorie sono state scelte anche per la loro diffusa disponibilità nelle certificazioni dalle quali si sono presi i dati che sono andati a formare il database nella fase di inventario.

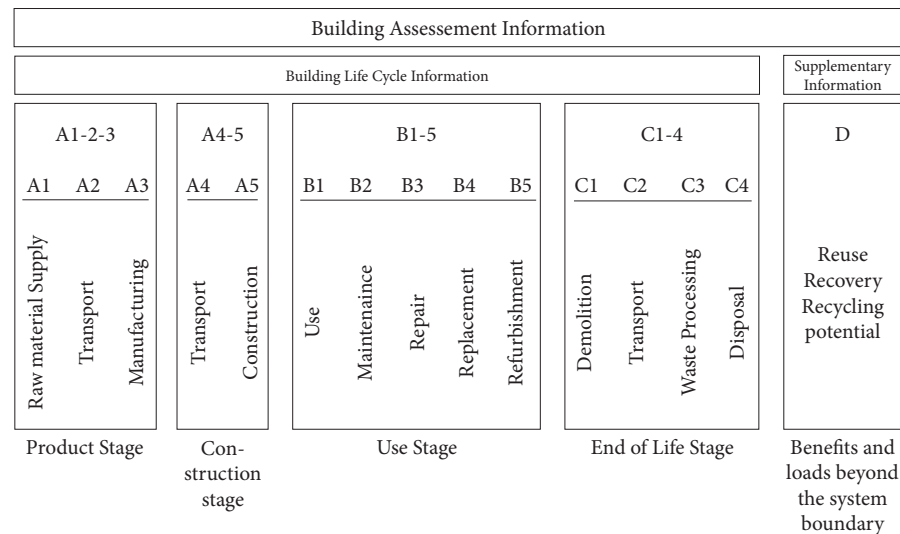
Le norme internazionali prevedono fasi facoltative che consistono nel raggruppare e ordinare le categorie d'impatto. L'ultima fase, facoltativa, è la pesatura, che consiste nell'esprimere l'importanza soggettiva di ogni categoria d'impatto fornendo un indice unico. Segue una descrizione di ogni singolo indicatore di impatto:

GWP (Global Warming Potential o potenziale di riscaldamento globale)

L'impatto rappresenta un aumento medio della temperatura terrestre dovuto alla concentrazione nell'atmosfera di gas (chiamati Green House Gases - GHG) come l'anidride carbonica (CO2), il metano (CH4), il protossido di azoto (N2O), gli idrofluorocarburi (HFC) e altri. Le radiazioni a onde corte provenienti dal sole entrano in contatto con la superficie terrestre e vengono parzialmente riflesse. I gas serra assorbono questa radiazione riflessa nella troposfera ed emettono indietro in tutte le direzioni, anche all'indietro rispetto alla superficie terrestre. Così la quantità di radiazioni che il nostro pianeta è in grado di cedere allo spazio esterno si riduce e la temperatura media degli strati dell'involucro atmosferico tende ad aumentare. Per i gas diversi dalla CO2, la categoria d'impatto del GWP è calcolata in equivalenti di biossido di carbonio (kg CO2-eq). Ciò significa che il GWP di ogni emissione è espresso in relazione alla CO2. Un periodo di 100 anni è tipico per i database GWP ed è coerente con la LCA dell'edificio. La produzione di energia è il principale contributore di emissioni di CO2.

ODP (Ozone Depletion Potential o riduzione dello strato di ozono nella stratosfera)

L'ozono atmosferico (O3) assorbe una grande porzione dei raggi UV del sole, impedendo alla luce ultravioletta di perforare l'atmosfera terrestre, proteggendo così dai cancerogeni raggi UVB. A seconda delle condizioni climatiche, l'azione dei composti clorofluorocarburi (CFC) e di altri gas scompone lo strato di ozono, riducendo così l'effetto protettivo sulla superficie terrestre. L'ODP è espresso in termini di massa equivalente di triclorofluorometano (kg CFC11-eq). Le fonti comuni di gas che riducono lo strato di ozono sono i refrigeranti e gli agenti espandenti. Nell'industria manifatturiera dei materiali da costruzione, sono state prese misure per sostituire i gas che riducono lo strato di ozono con gas non esauribili come gli Idrocarburi (HFC). Questi, tuttavia, hanno molto spesso un impatto elevato sul GWP, dimostrando l'importanza di considerare impatti multipli per affrontare la sostenibilità di un sistema, prodotto o processo.



40.

Sopra: grafico rappresentante il ciclo di vita ed i moduli per la valutazione ambientale di un edificio. Ad ogni fase corrisponde una certa emissione che viene dichiarata negli EPD dei materiali. Data la natura gratuita degli EPD utilizzati, non sempre questi sono risultati completi. (UNI EN 15978)

AP (Acidification Potential o acidificazione del suolo e dell'acqua)

Comprende processi che aumentano l'acidità, la concentrazione di ioni idrogeno (H⁺), dell'acqua, dell'aria e del suolo. L'acidificazione dei terreni avviene attraverso la trasformazione degli inquinanti atmosferici in acidi. Questo porta ad una diminuzione del valore del pH dell'acqua piovana e nebbia, producendo ed effetto chiamato "pioggia acida", che causa danni agli ecosistemi anche a notevoli distanze dall'originale fonte dell'emissione. I principali gas che causano l'AP sono gli ossidi di azoto (NO_x) e gli ossidi di zolfo (SO_x). Anche l'ammoniaca e il fluoruro di idrogeno sono contribuenti delle piogge acide, anche se in misura minore. NO_x e SO_x sono comunemente emessi come risultato della combustione di combustibili fossili, che hanno una grande rilevanza nel settore dell'edilizia. I fattori AP che ne derivano sono espressi in mole di idrogeno o deposito equivalente di anidride solforosa per kg di emissione (kg SO₂-eq).

EP (Eutrophication Potential o eutrofizzazione)

Eutrofica significa ben nutrita, riferendosi quindi all'aggiunta naturale o artificiale di sostanze nutritive all'ambiente, in particolare agli organismi d'acqua. I nitrati e i fosfati sono essenziali per la vita, ma l'aumento delle concentrazioni nei corpi idrici può favorire un'eccessiva crescita di alghe. Mentre le alghe muoiono e si decompongono, alti livelli di materia organica esauriscono l'ossigeno disponibile, causando la morte di altri organismi. Questo porta ad una riduzione complessiva della biodiversità di questi ambienti e, come effetto secondario, ai danni degli organismi non acquatici ed esseri umani che si basano su questi ecosistemi. L'eutrofizzazione è misurata utilizzando l'unità di riferimento di kg equivalenti di azoto o fosfato (kg [PO₄]₃-eq).

ADPE e ADPF (Abiotic Depletion Potential of Elements and Fossil Fuels)

Deplemare una risorsa significa che la sua quantità presente sulla terra si sta riducendo. ADPE Si riferisce alla riduzione delle riserve geologiche e naturali che non si rigenerano nel corso della vita umana. L'ADP di una risorsa è stato definito come il rapporto tra la produzione annuale e il quadrato della riserva ultima (della risorsa diviso per lo stesso rapporto per una risorsa di riferimento, l'antimonio (Sb). L'indicatore ADPE viene, infatti, misurato in kg equivalenti di antimonio (kgSbe).

Una categoria a parte è stata creata, a partire dal 2002, per il consumo dei combustibili fossili, che viene rappresentato dall'indicatore ADPF, la cui unità di misura risulta essere i kg di antimonio equivalenti rapportati ai MJ che misurano l'energia del combustibile considerato.

NW o FW (Use of Net Freshwater)

Il consumo di acque dolci viene misurato in metri cubi di consumo di acqua equivalente.

La fase di interpretazione affianca le precedenti fasi costantemente, allo scopo di valutare i risultati e di giungere a conclusioni, in conformità con l'obiettivo e lo scopo dello studio. Per la valutazione di un intero edificio, le fasi 2, 3 e 4 devono essere applicate ad ogni fase del ciclo di vita dell'edificio. Le norme e la letteratura definiscono ogni fase con un modulo per identificare chiaramente gli input e gli output dei sistemi.



5. FASE DI PRODUZIONE E COSTRUZIONE

*.A1-3: dalla culla al cancello
.Quantitativi
.Risultati ed osservazioni
.Considerazioni economiche
.A4: dal cancello al sito
.Risultati ed osservazioni
.A5: costruzione
.Risultati ed osservazioni*

La fase di produzione delle materie prime è formata dai moduli A1, A2 e A3 che rappresentano rispettivamente l'estrazione delle materie prime, il loro trasporto fino al sito di lavorazione e le lavorazioni per trasformare le materie prime in materiali da costruzione. Le emissioni legate a queste attività sono state ottenute combinando i dati presi dalle EPD e le quantità di materiale utilizzate nei due diversi edifici, il tutto effettuato in maniera manuale attraverso l'utilizzo del software Microsoft Excel.

Nel successivo modulo A4, si analizzano le emissioni dovute al trasporto dei materiali da costruzione dal sito di produzione al cantiere, considerando le distanze effettive che hanno percorso i materiali utilizzati presso il cantiere di Dougourakoro.

Il modulo A5 rappresenta le emissioni dovute alle lavorazioni in cantiere per la costruzione dell'edificio. Si presenta la realtà locale che è stata vissuta seguendo il cantiere della scuola Kalan Deme So e si sottolinea come la maggior parte delle lavorazioni vengano svolte in modo manuale, specialmente per edifici con dimensioni simili a quelli analizzati in questo studio. Per questo motivo le emissioni legate alla fase di costruzione e legate all'utilizzo di macchinari da cantiere alimentati elettricamente o tramite l'utilizzo di combustibili fossili, risultano avere un'influenza sui risultati finali dell'analisi LCA inferiore al 5%. Si sottolinea come questo basso contributo sia dovuto ad una quasi assenza di emissioni a livello di cantiere e non ad un'eventuale imprecisione dei calcoli delle altre fasi. A livello ambientale, dunque, la fase di costruzione, rappresentata dal modulo A5, risulta essere estremamente vantaggiosa.

Il ciclo di vita della maggior parte dei prodotti per l'edilizia inizia con l'estrazione delle materie prime. I dati relativi a questa fase includono, oltre alle emissioni dovute all'estrazione ed alla raccolta di materie prime, anche quelle dovute al trasporto di queste presso l'impianto di lavorazione, che definisce il confine fra l'estrazione e la produzione. Successivamente, durante la fase di produzione, le materie prime vengono convertite in materiali da costruzione, pronte per la consegna in cantiere. Questa fase rappresenta tipicamente la maggior parte dell'energia incorporata e delle emissioni associate al ciclo di vita dei prodotti per l'edilizia. L'energia incorporata è definita dalla guida BSRIA (Building Services Research and Information Association) come "l'energia primaria totale consumata dai processi diretti e indiretti associati ad un prodotto o ad un servizio ed entro il confine tra culla e cancello". Ciò include ogni fase ed emissione generata fino a quando il prodotto non è pronto a lasciare il cancello della fabbrica". La fase "dalla culla al cancello" comprende i moduli A1-2-3 e, all'interno del ciclo di vita di un edificio, è definita come la fase di produzione.

Come già detto, la raccolta dei dati è avvenuta in maniera manuale, prendendo le informazioni da diverse certificazioni ambientali (EPD) e creando un database attraverso l'organizzazione di questi dati in fogli excel. Data l'assenza di EPD per quanto riguarda il Mali e la scelta di utilizzare risorse gratuite, si è cercato di utilizzare solamente materiali da costruzione i cui EPD testimoniassero un livello di lavorazione che fosse il più semplice possibile e che potessero essere adattati alla realtà maliana. Si sono esclusi tutti quei materiali di provenienza nord europea e americana, andando a considerare le EPD di prodotti provenienti da paesi come la Turchia, l'est Europa o zone con condizioni climatiche simili, come Emirati Arabi Uniti. I dati degli EPD sono stati resi utilizzabili trasformandoli nei rispettivi valori per kg di materiale utilizzato, così da essere poi moltiplicati per i quantitativi dei rispettivi edifici e poter fornire le loro emissioni per ogni fase.

Material	Emissions/kg- Stage A1/A3						
	GWP [KgCO2e/kg]	ODP [KgCFC11e/kg]	AP [KgSO2e/kg]	EP [Kg(PO4)3e/kg]	ADPE [kgSbe/kg]	ADPF [MJ/kg]	NW [m3/kg]
Aggregates	2,854E-03	6,025E-17	6,814E-06	1,327E-06	6,919E-10	3,474E-02	6,913E-06
Cement	7,060E-01	1,880E-11	1,680E-03	1,550E-04	2,090E-06	3,400E+00	2,470E-06
Countertop	2,717E-01	3,043E-09	6,739E-04	5,435E-04	3,804E-07	4,022E+00	1,522E-03
Earth	4,675E-03	1,663E-18	1,564E-05	3,677E-06	2,432E-10	6,175E-02	1,365E-06
Non Structural Steel	2,360E+00	4,354E-11	8,080E-03	7,159E-04	2,150E-07	2,721E+01	1,115E-02
Plaster	1,750E-01	3,725E-08	7,350E-04	3,100E-04	1,505E-07	2,800E+00	6,900E-04
Structural Steel	1,680E+00	4,970E-10	3,800E-03	3,820E-04	2,150E-07	1,320E+01	2,530E-03

41.

A fianco: tabella rappresentante le emissioni al kg di ogni materiale considerato in questo studio per le fasi A1,2,3. Le emissioni al kg sono state ottenute moltiplicando i valori forniti da ogni EPD per le relative unità funzionali di riferimento, fornite sempre dagli EPD.

Questo procedimento è stato effettuato manualmente e tramite l'organizzazione del database in fogli dati, usando il software Microsoft Excel. Per ogni dato considerato in questo studio è stata valutata l'opzione disponibile che più si avvicinasse alla realtà maliana, in base alla propria esperienza su luogo. Si segnala che, per quanto riguarda l'acciaio non strutturale, utilizzato principalmente per la lamiera di copertura, si sono utilizzati dati che prendevano in considerazione acciaio vergine, in quanto erano i più vicini alla realtà locale come produzione e caratteristiche. Tenendo presente questo ci si possono spiegare i valori alti di questo materiale, anche rispetto all'acciaio strutturale, che invece si considera ottenuto tramite il riciclo di altro acciaio precedentemente utilizzato, come ormai è prassi a livello internazionale.

I dati così ottenuti vanno combinati con le quantità di materiale utilizzate in ogni edificio, così da ottenere le emissioni relative a queste fasi. I quantitativi presi in considerazione per l'edificio in terra sono quelli effettivamente utilizzati, mentre per l'edificio in mattoni forati in cemento si è ipotizzato l'utilizzo di mattoni delle dimensioni di 20x20x40cm. Questi vanno a contribuire alla formazione di un sistema di muratura, su cui poggia un cordolo in calcestruzzo armato e che viene affiancata puntualmente da pilastri in calcestruzzo armato.

42.

A fianco: tabelle con riportati i quantitativi dei materiali utilizzati nei due edifici comparati nello studio: quello in mattoni in terra compressa (CEB) e quello in mattoni forati in cemento (CHB). Si sottolinea che nelle tabelle non sono riportati tutti i materiali utilizzati nei due edifici ma solamente quelli che si sono considerati nell'analisi e che si ritiene portino variazioni degne di nota nella comparazione dei due edifici.

Materials	Compressed Earth Blocks	
	P	V tot
Aggregates	79867,1 [kg]	35,128 [m3]
Cement	17768,14 [kg]	12,9227 [m3]
Earth	42996,23 [kg]	93,3018 [m3]
Non Structural Steel	2470 [kg]	260 [m2]
Structural Steel	4483,174 [kg]	0,5711 [m3]

Materials	Concrete Hollow Blocks	
	P	V tot
Aggregates	110661,44 [kg]	52,24 [m3]
Cement	18406,07 [kg]	8,60 [m3]
Countertop	1795,47 [kg]	292,74 [m3]
Non Structural Steel	2375,00 [kg]	250,00 [m2]
Structural Steel	1153,20 [kg]	0,15 [m3]
Plaster	5444,01 [kg]	8,38 [m3]

Il consumo di materiale per l'edificio in mattoni in cemento (CHB) risulta essere inferiore, non essendo dotato di doppie pareti ventilate ed essendo necessario meno materiale per la produzione dei mattoni forati in cemento rispetto a quelli pieni in terra. Questo potrebbe essere un vantaggio a livello di emissioni e soprattutto a livello economico in queste prime fasi, ma si crede che il design bioclimatico, unito all'uso di un materiale dalle caratteristiche come quelle della terra cruda, possa garantire una vantaggio sotto entrambi gli aspetti nelle fasi successive del ciclo di vita di un edificio. Vengono, dunque, presentati i quantitativi utilizzati nei due edifici che fanno parte di questo studio LCA.

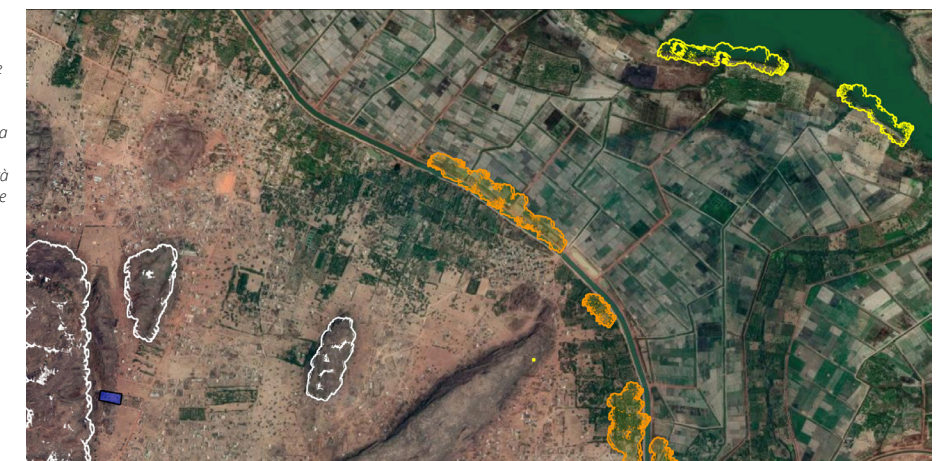
Nei quantitativi di cemento e di aggregati si sono incluse anche quelle parti che vanno a formare i mattoni, sia forati che in terra (percentuale di cemento stabilizzante). I mattoni si sono, infatti, "spacchettati" per analizzarne meglio la composizione, avere un maggiore controllo sui risultati, ma soprattutto per riuscire a reperire dati ed EPD affidabili e che si avvicinassero quanto più possibile alla realtà locale maliana. Come si è visto nei precedenti capitoli, infatti, la maggior parte delle lavorazioni per trasformare le materie prime in materiali da costruzione sono svolte in cantiere, in particolare per quanto riguarda i mattoni. Dividendo gli elementi costruttivi nelle loro componenti si riesce ad essere più coerenti e si diminuisce il rischio di giungere a risultati falsati.

43.

A fianco: foto aerea che mostra da dove è stato possibile estrarre le materie prime per la realizzazione della scuola Kalan Deme So. Per la quanto riguarda la terra cruda, è importante sottolineare come la disponibilità locale sia stata ignorata a favore di una terra la cui composizione era già stata analizzata, proveniente da circa 15 km dal cantiere.

LEGENDA:

- = Pietra
- = Terra argillosa
- = Sabbia



PRISULTATI

Product stage - A1, A2, A3							
	GWP [kgCO2e]	ODP [kgCFC11e]	AP [kgSO2e]	EP [kg(PO4)3e]	ADPE [kgSbe]	ADPF [MJ]	NW [m3]
CEB	2,63E+04	2,67E-06	6,81E+01	6,50E+00	3,87E-02	1,92E+05	3,95E+01
CHB	2,23E+04	2,09E-04	6,05E+01	7,80E+00	4,08E-02	1,69E+05	3,67E+01
DIFF. %	18,12%	-98,72%	12,57%	-16,72%	-5,17%	13,92%	7,62%

44.

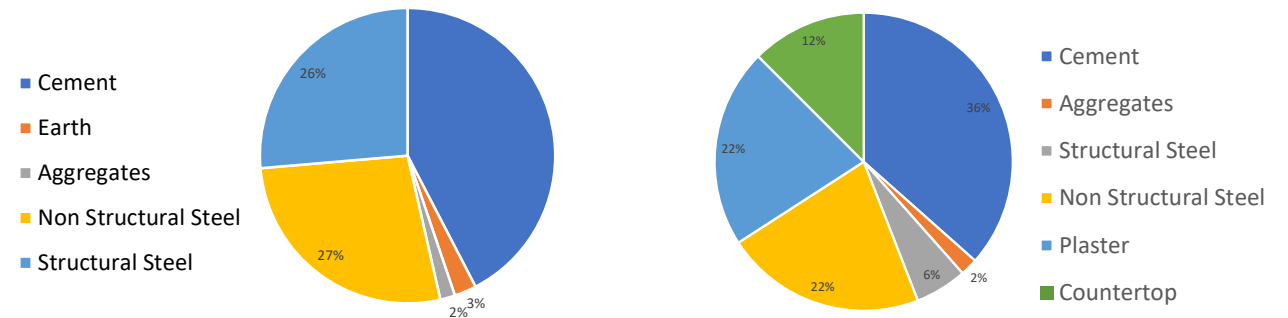
A fianco: tabella illustrativa dei risultati delle fasi A1,2,3 per i mattoni in terra (CEB), i mattoni in cemento (CHB) e la differenza percentuale dei primi rispetto ai secondi.

Oltre al confronto fra i risultati dei due edifici, si ritiene possa risultare utile, per trarre ulteriori conclusioni ed indagare le possibili soluzioni per mitigare le emissioni dovute a questa fase, analizzare il contributo che ogni materiale apporta ai risultati finali sopra presentati per ogni tipologia di edificio. Si utilizzano dei grafici a torta che rendono l'idea del contributo percentuale di ogni materiale alle emissioni sopra riportate.

CEB

CHB

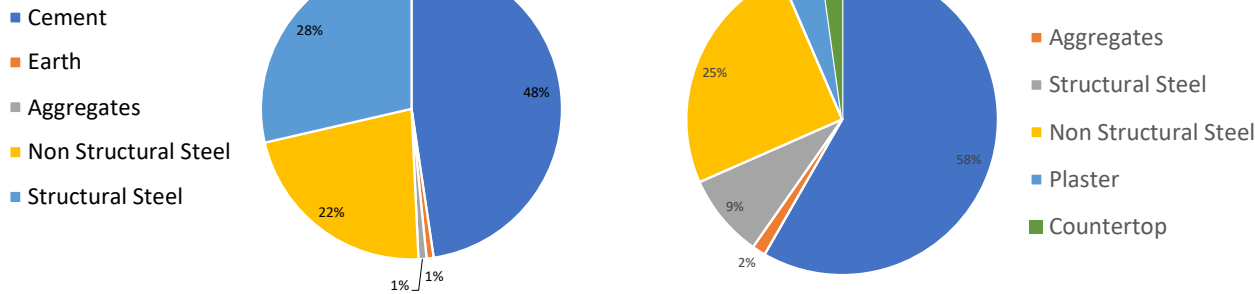
EP [kg(PO4)3e]



CEB

CHB

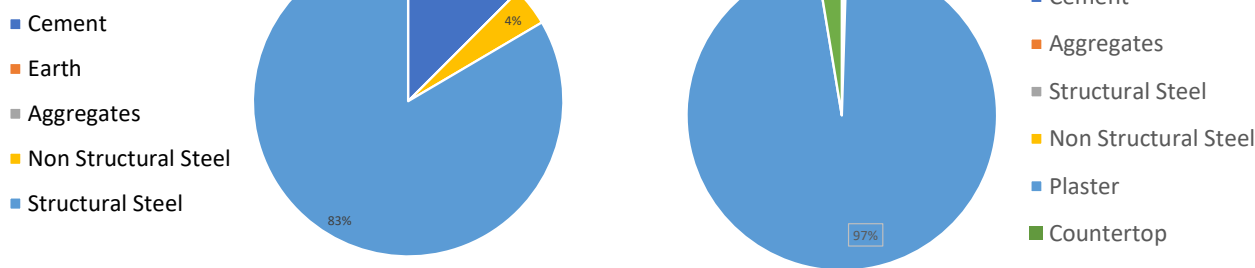
GWP [kgCO2e]



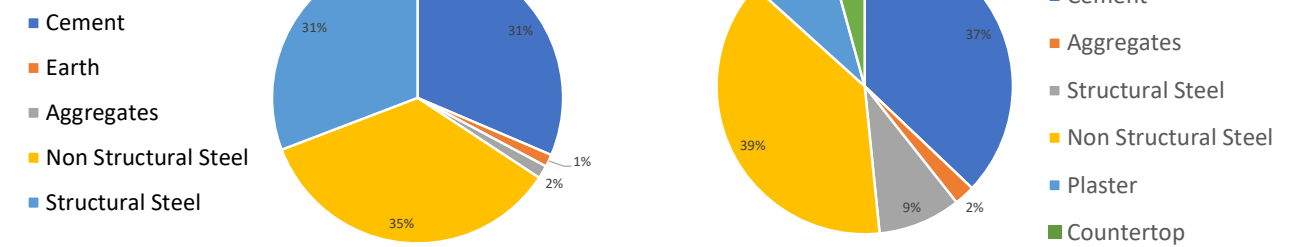
ADPE [kgSbe]



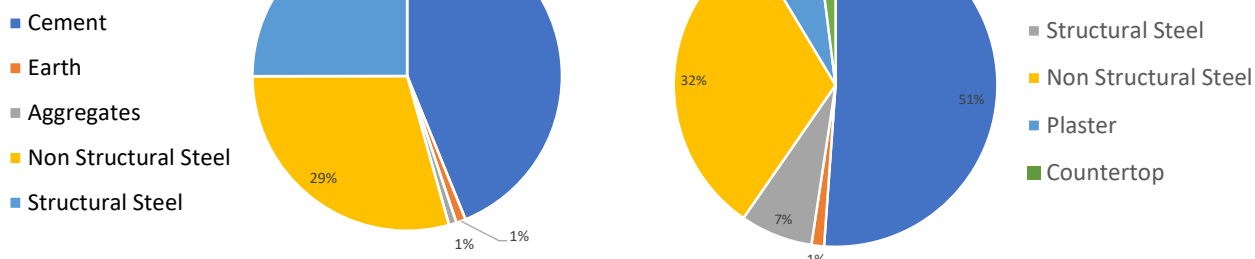
ODP [kgCFC11e]



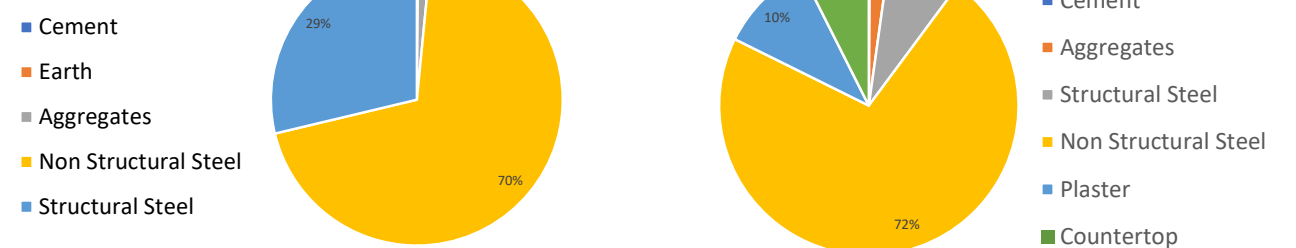
ADPF [MJ]



AP [kgSO2e]



NW [m3]



Osservando i risultati che lo studio dei moduli A1, A2 e A3 forniscono, ci si trova in una situazione in cui non viene affermata la netta sostenibilità di un edificio rispetto ad un altro. Questo si può spiegare guardando i maggiori quantitativi di materiale utilizzati per realizzare l'edificio bioclimatico. Queste quantità risultano chiaramente determinanti quando si parla di estrazione di materie prime e loro lavorazioni. Volendo approfondire i risultati relativi a queste emissioni, risulta estremamente interessante osservare l'incidenza percentuale di ogni materiale sulle emissioni per ogni categoria d'impatto, presentate attraverso l'utilizzo di grafici a torta, così da comprendere affondo il contributo della terra cruda alle emissioni risultanti e quello degli altri materiali e non limitare il confronto ad una singola percentuale, che si crede possa includere aspetti altrettanto interessanti. Da qui, nascono diverse osservazioni che si provano ad illustrare brevemente:

- L'impatto del cemento su un edificio che si propone di utilizzare principalmente la terra cruda come materiale da costruzione è decisamente troppo alto. È necessario, dunque, limitare al minimo l'utilizzo del cemento per poter avere un edificio che si possa dire costruito in terra e che sia principalmente caratterizzato, anche a livello di emissioni, da questo materiale. Si crede che questo risultato sia raggiungibile attraverso diverse strade, come l'eliminazione della percentuale di stabilizzazione nel caso in cui i mattoni in terra vengano usati solo come tamponamento, o l'eliminazione del cemento intesa come eliminazione della struttura a pilastri in cui la muratura viene inserita, andando a dare una funzione pienamente portante alla muratura. L'esperienza in loco ed il dialogo con gli ingegneri maliani hanno restituito l'idea che, oltre a fattori sociali per cui un edificio in terra viene collegato ad una bassa estrazione sociale, ciò che frena fortemente l'uso della muratura in terra cruda, ma anche cotta, è una limitata familiarità con le sue caratteristiche e coi suoi comportamenti strutturali, per cui la si va ad inquadrare in una struttura a telaio in calcestruzzo armato o comunque ad armare puntualmente, affiancando due tipologie strutturali profondamente diverse tra loro e che difficilmente riescono a collaborare. La capacità portante della muratura, che è ormai testimoniata da diversi studi che supportano la sua affidabilità, specialmente utilizzando mattoni in terra compressa e caratterizzati da un mix selezionato, non è recepita ed apprezzata fino in fondo, venendo quindi degradata. Questo comporta una maggiore quantità di cemento utilizzata, che va ad influire pesantemente sui risultati di queste prime fasi. Eliminando la parte di cemento stabilizzante e proteggendo la muratura dall'acqua con vernici idrorepellenti, che sono tutt'oggi utilizzate nella maggior parte dei casi, o eliminando una parte della struttura in calcestruzzo armato che viene inserita a supporto della muratura, le emissioni dell'edificio in terra cruda potrebbero essere significativamente ridotte, arrivando ad esprimere il vero potenziale a livello ambientale della terra cruda come materiale da costruzione.

- Nonostante si operi in un contesto molto povero e con scarse risorse, risulta evidente l'alto potenziale inespresso dei materiali locali e delle conoscenze che potrebbero favorire l'uso. Proprio queste conoscenze risultano, ad oggi, essere assenti o veramente poco diffuse anche fra i professionisti. Attraverso attività di formazione, informazione e pubblicizzazione, sia fra i professionisti che a livello di comunità, si crede che sia possibile perseguire una maggiore diffusione dei macchinari e delle conoscenze per costruire in terra cruda, diffondendone l'uso ed abbattendone i prezzi, che si ipotizza possano potenzialmente arrivare ad essere competitivi con quelli dei mattoni forati in cemento, cosa che in questo momento non è assolutamente possibile.

45.

A fianco: tabelle rappresentative i prezzi unitari e le quantità dei materiali considerati nell'analisi. I prezzi sono stati ricavati dai prezzi maliani e sono, dunque in franchi CFA. Il tasso di cambio è pari a 1 € = 656 XOF. La prima tabella fa riferimento all'edificio in mattoni in terra compressa (CEB) e la seconda a quello in mattoni forati in cemento (CHB).

Computo metrico estimativo degli elementi considerati nell'analisi dell'edificio in terra

Materiali	Unità di misura	Quantità	Prezzo unitario	Totale
Mattone CEB stabilizzato	m2	440	20.000,00 XOF	8.800.000,00 XOF
Mattone CEB per volte di copertura	m2	170	17.500,00 XOF	2.975.000,00 XOF
Calcestruzzo armato dosato a 350 kg/m3	m3	32	145.000,00 XOF	4.640.000,00 XOF
Lamiera grecata di copertura (con vernice antiruggine)	m2	250	11.500,00 XOF	2.875.000,00 XOF
Travi IPE120	ml	123,5	13.250,00 XOF	1.636.375,00 XOF
				20.926.375,00 XOF

Computo metrico estimativo degli elementi considerati nell'analisi dell'edificio in cemento

Materiali	Unità di misura	Quantità	Prezzo unitario	Totale
Mattone CEB stabilizzato	m2	240	7.500,00 XOF	1.800.000,00 XOF
Calcestruzzo armato dosato a 350 kg/m3	m3	23	145.000,00 XOF	3.335.000,00 XOF
Controsoffitti	m2	189	4.500,00 XOF	850.500,00 XOF
Lamiera grecata di copertura (con vernice antiruggine)	m2	240	11.500,00 XOF	2.760.000,00 XOF
Intonaci	m2	420	3.000,00 XOF	1.260.000,00 XOF
				10.005.500,00 XOF

Nell'ottica di una sostenibilità ambientale raggiungibile solo in seguito ed attraverso trasformazioni sociali e che deve essere sostenuta da una sostenibilità economica, specialmente in una realtà estremamente povera come quella maliana, si ritiene interessante presentare una breve analisi dei costi dei materiali di cui si analizzano gli impatti ambientali. Si fa da subito presente che, come lo studio LCA non vuole avere validità assoluta ma vuole riuscire a comparare le emissioni dovute all'uso di diversi materiali e modi di progettare, così il breve studio dei costi presentato si focalizza sui materiali che, per quantità o per tipo di materiale, influenzano maggiormente la differenza fra i due edifici. La valuta utilizzata è quella del franco CFA, indicato con XOF, che rappresenta la valuta locale maliana e dell'Africa occidentale in generale. Un euro corrisponde a 656 franchi CFA. In base a questi dati si può, dunque, notare come la differenza di costi tra i due edifici sia decisamente importante, con l'edificio in terra cruda che va a costare oltre il doppio di quello in cemento, con un sovrapprezzo di oltre 10.000.000 XOF, corrispondenti a circa 15.300€.

Si crede che la differenza di costo possa essere abbattuta attraverso la diffusione di conoscenze e strumenti per la costruzione in terra cruda, come detto nel paragrafo precedente e che i costi maggiori che devono essere sostenuti per ottenere un edificio bioclimatico efficiente possano essere compensati con i risparmi dovuti ai minori consumi dovuti alla fase di uso durante la vita dell'edificio. Come già detto, questa ulteriore analisi non è stata effettuata e la fase di uso non è stata inclusa in questo studio LCA a causa di mancanza di dati relativi ai carichi termici e per questo si rimanda l'eventuale approfondimento di questa fase, tenendo presente fin da ora, però, le eventuali strategie per poter garantire una sostenibilità economica che supporti quella ambientale.

DAL CANCELLO AL SITO

Il modulo A4 riguarda il trasporto dei materiali dal luogo in cui le materie prime sono state lavorate per essere trasformate in materiali da costruzione al sito dove verranno utilizzati per costruire l'edificio. Si definisce "dal cancello al sito" figurandosi il materiale che, dopo essere stato estratto e lavorato (from cradle to gate) è pronto ad essere trasportato dal cancello della fabbrica al sito del cantiere (from gate to site).

Si è, dunque, ricercata la provenienza dei materiali utilizzati nei due edifici oggetto di studio: il cemento arriva in cantiere in sacchi da 50 kg ed è importato dal Senegal, in particolare da Kirenè, località dove si trova un cementificio e da cui proviene il cemento utilizzato per la costruzione della scuola Kalan Deme So. I diversi aggregati utilizzati provengono dai dintorni di Dougourako e si è usata una distanza di 15 km dal cantiere, stessa distanza utilizzata per la terra che, nonostante la possibilità di essere estratta nei dintorni del cantiere è stata prelevata da Sirakoro, località a 15 km da Dougourakoro, in quanto era già stata utilizzata dagli ingegneri in altri progetti ed il mix era conosciuto. Per quanto riguarda l'acciaio strutturale, questo viene importato dall'Europa o dalla Cina ed arriva al porto di Dakar, in Senegal in container. Risultando minimo il peso dell'acciaio strutturale utilizzato rispetto a quello che viene trasportato in un container, le emissioni di questa parte si sono ritenute trascurabili, andando a considerare solo le emissioni dovute al trasporto dal porto di Dakar al cantiere. Un discorso simile è stato fatto per l'acciaio non strutturale, utilizzato principalmente per la lamiera di copertura. Queste lamiere sono importate sempre da Europa e Cina e successivamente dal Senegal ma, essendo largamente disponibili nel mercato maliano per il loro largo utilizzo, si è scelto, anche su indicazione degli ingegneri locali, di considerare la distanza da Bamako, dove vengono acquistate e sono largamente disponibili. Gli intonaci ed il cartongesso che va a formare i controsoffitti dell'edificio in mattoni in cemento vengono fabbricati ed importati sempre dal Senegal e si è preso come riferimento la fabbrica Sika, nei pressi di Dakar.

47.

A fianco: esempi di sacchi di cemento da 50 kg utilizzati in cantiere per la costruzione della scuola Kalan Deme So a Dougourakoro e provenienti dal cementificio di Kirenè, in Senegal.



Materials	Compressed Earth Blocks	
	Distance	Locality
Aggregates	15 [km]	Dougourakoro
Cement	1235 [km]	Kirenè, Senegal
Earth	15 [km]	Sirakoro
Non Structural Steel	27 [km]	Bamako
Structural Steel	1262 [km]	Port of Dakar, Senegal

Materials	Concrete Hollow Blocks	
	Distance	Locality
Aggregates	15 [km]	Dougourakoro
Cement	1235 [km]	Kirenè, Senegal
Countertop	1245 [km]	Dakar, Senegal
Non Structural Steel	27 [km]	Bamako
Structural Steel	1262 [km]	Port of Dakar, Senegal
Plaster	1245 [km]	Dakar, Senegal

46.

A fianco: tabelle rappresentanti le distanze e le località considerate nello studio per calcolare le emissioni relative al modulo A4. Si può notare come l'edificio in mattoni (prima tabella) favorisca, per scelta progettuale, l'utilizzo di materiali locali, volendo limitare al massimo l'utilizzo di materiali importati rispetto all'edificio in mattoni in cemento (tabella sotto).

Per misurare le emissioni dovute a questa fase si sono considerate le emissioni del combustibile diesel al chilowattora, ricavate come i precedenti dati, attraverso una ricerca fra diverse certificazioni e studi LCA già svolti, ritenuti affidabili per quanto riguarda i dati riferiti al gasolio, in quanto le variazioni a seconda dei paesi risultano essere minime.

Material	Emissions/kWh- StageA4						
	GWP [KgCO2e / kW-h]	ODP [KgCFC11e/ kW-h]	AP [KgSO2e/ kW-h]	EP [Kg(PO4)3e/ kW-h]	ADPE [KgSbe/ kW-h]	ADPF [MJ/ kW-h]	NW [m3/ kW-h]
Diesel	0,27	2,83E-12	6,57E-05	1,00E-09	0,00E+00	3,39E-01	9,56E-06

48.

Sopra: emissioni del carburante diesel considerate per valutare le emissioni della fase A4.

Queste emissioni sono state combinate con quella che si può definire come la potenza espressa da un camion da trasporto standard. Si intende, cioè, la potenza impiegata dal camion per trasportare una determinata quantità di materiale (illustrate precedentemente nei quantitativi) per una determinata distanza. Per maggiore chiarezza si presenta di seguito la formula utilizzata per ottenere la potenza in chilowattora che tenga conto del peso del materiale trasportato e della potenza del camion (386 kW).

$$P = \text{Potenza camion} \times \frac{\text{Peso materiale trasportato}}{\text{Carico massimo camion}} \times \frac{\text{Distanza percorsa}}{\text{Velocità massima camion}}$$

Le potenze risultanti dalla formula precedente sono illustrate nelle seguenti tabelle e, moltiplicate per le emissioni del gasolio, restituiscono i valori delle emissioni dovute alla fase A4.

Materials	Compressed Earth Blocks
	Power [kWh]
Aggregates	211,16
Cement	3867,69
Earth	113,67
Non Structural Steel	11,75
Structural Steel	997,21

49.

A fianco: tabelle rappresentanti i risultati della formula sopra citata. Per ogni materiale si considera la potenza espressa dal camion per il trasporto. Il risultato tiene conto della potenza del camion, della quantità di materiale trasportato e della distanza percorsa.

Materials	Concrete Hollow Blocks
	Power [kWh]
Aggregates	292,57
Cement	4006,55
Countertop	394,00
Non Structural Steel	11,30
Structural Steel	256,51
Plaster	1194,62

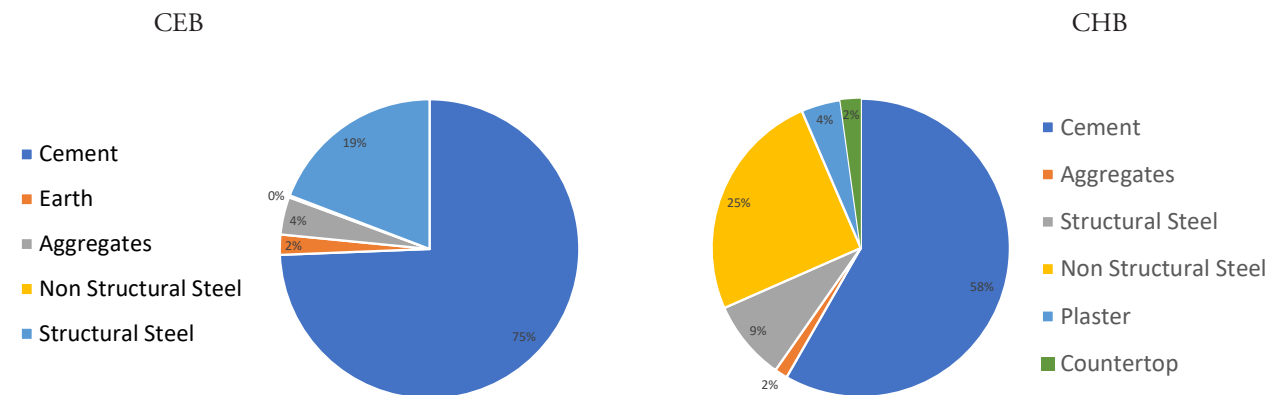
51.

A fianco: tabella illustrativa dei risultati della fase di trasporto dalla fabbrica al cantiere (A4) per i mattoni in terra (CEB), i mattoni in cemento (CHB) e la differenza percentuale dei primi rispetto ai secondi.

Gate to Site - A4							
	GWP [KgCO2e]	ODP [KgCFC11e]	AP [KgSO2e]	EP [Kg(PO4)3e]	ADPE [kgSbe]	ADPF [MJ]	NW [m3]
CEB	1,40E+03	1,47E-08	3,42E-01	5,20E-06	0,00E+00	1,76E+03	4,97E-02
CHB	1,66E+03	1,74E-08	4,04E-01	6,16E-06	0,00E+00	2,09E+03	5,88E-02
DIFF. %	-15,50%	-15,50%	-15,50%	-15,50%	0,00%	-15,50%	-15,50%

Come per i moduli precedenti, oltre a riportare i risultati complessivi e la differenza percentuale fra l'edificio in terra e quello in mattoni in cemento, si presenta l'incidenza percentuale di ogni singolo materiale sul risultato finale. Viste le incidenze simili per ogni indicatore, si presentano due grafici a torta generale che possono fare riferimento ad ogni indicatore presentato nella tabella sopracitata.

Incidenze percentuali dei materiali sui singoli risultati del modulo A4



50.

Esempi di mezzi per il trasporto di materiali ed elementi costruttivi.

I valori risultanti dal modulo A4 e la differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici scoprono la natura locale dei materiali utilizzati nella costruzione dell'edificio in terra. Questo è sicuramente un caposaldo delle scelte effettuate dal progettista che si realizza pienamente nei risultati forniti sopra. La scelta di puntare sull'utilizzo dei materiali locali realizza, dunque, appieno la volontà di contenere le emissioni e di realizzare un edificio che incontri al meglio le necessità di sviluppo sostenibile moderne. Facendo riferimento al concetto di sviluppo sostenibile che guida questo intero studio e guardando all'origine locale dei materiali utilizzati nel progetto Kalan Deme So, risulta come in questa fase del ciclo di vita del progetto si vada anche a stimolare uno sviluppo economico locale, legato all'origine dei materiali. Aspetti economici e locali non sono approfonditi particolarmente in questo studio ma si ritiene importante porre l'attenzione anche su questi punti per non perdere mai di vista il quadro generale della realtà in cui lo studio si cala.

Come nel modulo precedente spostando l'attenzione sui grafici a torta che accompagnano la presentazione dei risultati generali, si ripropone l'idea per cui, nonostante l'utilizzo della terra cruda, il potenziale di questo materiale a livello di contenimento delle emissioni non riesca, ancora, ad essere pienamente espresso. Si sottolinea, dunque, come l'abbattimento della quantità di cemento utilizzato possa dare maggiore realizzazione all'utilizzo della terra cruda come materiale da costruzione. Si sottolinea nuovamente come questo risultato non sia ottenibile, almeno localmente, focalizzandosi sulla grande e potenziale sostenibilità ambientale della terra cruda, ma questa è da vedersi come un obiettivo pienamente possibile e realizzabile attraverso un processo di sviluppo sociale ed economico.

COSTRUZIONE

Per calcolare le emissioni dovute al cantiere ed alla costruzione dell'edificio si è considerata questa fase come un'ulteriore fase di produzione, in cui i materiali da costruzione, considerati come singoli prodotti, si uniscono nella produzione dell'intero edificio. Le emissioni di questa fase derivano dall'energia utilizzata per i principali macchinari coinvolti nelle operazioni di costruzione, che di solito consumano elettricità o combustibile. Nel caso specifico del cantiere di Dougourakoro, non essendo ancora presente nessun attacco per l'energia elettrica sono stati utilizzati macchinari alimentati a diesel. Si fa notare da subito come l'ammontare di questi macchinari sia estremamente ridotto: sul cantiere erano, infatti, presenti una betoniera ed un piccolo generatore di corrente utilizzato al bisogno.



52.

A fianco: foto panoramica del cantiere di Dougourakoro: si può notare come la presenza di macchinari sia limitata alla sola betoniera per il calcestruzzo. Sulla destra si può notare, inoltre, l'area del cantiere adibita alla produzione di mattoni in terra compressi.

In base a quanto verificato in cantiere ed utilizzando l'elenco delle lavorazioni ed il cronoprogramma elaborati per l'edificio Kalan Deme So, si sono stabilite le durate delle singole operazioni ed i macchinari utilizzati. A seconda delle lavorazioni è stata ipotizzata la presenza di più o meno lavoratori, aspetto questo difficilmente verificabile sul cantiere vista l'estrema variabilità delle presenze degli operai a seconda delle diverse necessità ed impedimenti caratteristici di una realtà come quella del Mali.

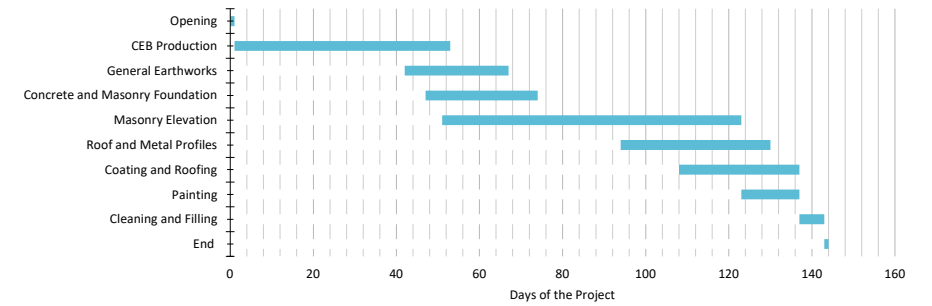
TASK NAME	START ON DAY	DURATION (WORK DAYS)
Kalan Deme So		
Opening	0	1
CEB Production	1	52
General Earthworks	42	25
Concrete and Masonry Foundation	47	27
Masonry Elevation	51	72
Roof and Metal Profiles	94	36
Coating and Roofing	108	29
Painting	123	14
Cleaning and Filling	137	6
End	143	1

53.

Sopra: elenco e durata delle lavorazioni per la costruzione della scuola Kalan Deme So.

54.

A fianco: diagramma di Gantt per la costruzione dell'edificio Kalan Deme So e per la gestione del reattivo cantiere.



Lo scarso utilizzo di macchinari durante le lavorazioni comporta un grande aumento delle lavorazioni manuali e quindi del numero di operai presenti sul cantiere. Si è ipotizzato che, fra la continua produzione di mattoni a cui almeno due operai si sono dedicati per gran parte della durata del cantiere, i diversi lavori di sterro necessari per la sistemazione delle fondazioni e dello zoccolo preesistenti e per tutta la durata del cantiere siano stati presenti in cantiere dai quattro ai dieci operai.

55.

A fianco: operai al lavoro durante la posa dei mattoni CEB in terra compressa. La maggior parte delle lavorazioni, anche per la costruzione di edifici di dimensioni più grandi, viene svolta manualmente.



56.

Sotto: foto panoramica del cantiere durante la posa della muratura. Si possono notare gli operai addetti ai lavori, la betoniera da cantiere e, sulla destra, l'area adibita alla produzione di mattoni CEB.



Date le bassissime emissioni fornite dai pochi macchinari presenti sul cantiere, si è ricercato ulteriormente quale contributo potesse essere considerato in questa fase così da approfondirla appieno ed adattare lo strumento dello studio LCA alla realtà locale. Si sono, perciò, incluse nelle emissioni dovute a questa fase, oltre a quelle dovute all'utilizzo dei macchinari da cantiere, anche quelle dovute ai mezzi di trasporto per recarsi al cantiere. Utilizzando come riferimento i mezzi maggiormente diffusi, come scooter ed automobili utilitarie. Combinando le emissioni del carburante diesel, illustrate nel paragrafo precedente e combinandole con le potenze dei veicoli si sono aggiunte queste emissioni a quelle dovute ai mezzi di cantiere, dando maggiore credibilità al contributo di questa fase. Si sottolinea come queste emissioni siano frutto di ipotesi che si crede possano rispecchiare abbastanza fedelmente la realtà locale in cui la presenza degli operai in cantiere non è garantita quotidianamente ed anche gli spostamenti non è detto che avvengano quotidianamente. Spesso, infatti, diversi operai si organizzano diversamente, restando a dormire in cantiere per un determinato periodo.



57.

A fianco: operai montano le finestre metalliche con l'uso di un soldatore ad elettrodo, a cui la corrente viene fornita grazie all'utilizzo di un generatore di corrente.

Viene portato come esempio il cantiere dell'edificio in terra cruda per l'ovvia ragione che è quello in cui si ha avuto l'opportunità di fare esperienza e di cui si sono raccolti e ricercati più dati ed informazioni. Oltre a ciò, si ritiene che, sempre dovendosi calare all'interno di una realtà profondamente diversa da quella europea, l'organizzazione e la direzione del cantiere, per gli standard maliani, siano state gestite al meglio. Si è considerato, perciò, questo cantiere come standard soddisfacente e si sono fatte ipotesi su quello dell'edificio in cemento. Si ipotizza che, data la minore complessità dell'edificio in mattoni in cemento, il cantiere di quest'ultimo duri un mese in meno. Questo risparmio si ipotizza che sia dovuto all'utilizzo di una parete singola invece che doppia ed alla minore complessità del sistema di copertura che, per l'edificio in mattoni in cemento, si ipotizza non ventilata, ma direttamente appoggiata sull'edificio.

Machinery involved	Engine Power [kW]
Generatore	4,150
Betoniera	12,000
Scooter	6,000
Yaris	48,000

58.

A fianco: tabella con indicate le potenze dei macchinari da cantiere utilizzati e dei principali veicoli usati dagli operai e dagli ingegneri per recarsi al cantiere da Bamako.

59.

Sotto: dettaglio della fase di costruzione delle piccole volte di copertura delle classi della scuola Kalan Deme So. Sono state utilizzate sia centine lignee che centine metalliche e le volte sono supportate da travi IPE120. Le volte totali sono 18 (6 per classe) per un totale di 19 travi d'acciaio.



60.

Sopra: fase di posa della lamiera utilizzata come copertura per riparare l'edificio dalle precipitazioni. Durante la stagione delle piogge, infatti, l'intera zona risulta allagata a causa delle precipitazioni e il vento risulta particolarmente violento. Per sollevare la lamiera dall'edificio e garantire un maggiore comfort termico, la si è agganciata ai cordoli superiori, allo zoccolo esterno ed alle travi IPE120 con dei profili d'acciaio.

Si presentano di seguito i risultati dell'analisi relativa al modulo A5, che fa riferimento alla costruzione dell'edificio. Si sottolinea come il contributo di questa fase sia poco influente sul risultato finale ma si sia ritenuto utile illustrare la realtà locale per meglio comprendere questo basso contributo. Si ribadisce anche come il contributo degli spostamenti di operai e professionisti per raggiungere il cantiere dalla capitale Bamako (distante circa 30 km) siano stati considerati nei risultati finali. Questi sono stati ottenuti moltiplicando i chilowattora risultanti dalle lavorazioni e dagli spostamenti per le emissioni dovute al combustibile diesel e già precedentemente utilizzate. L'energia elettrica non risulta essere utilizzata (se non attraverso un generatore alimentato dal carburante), in quanto l'intera zona non risulta essere ancora allacciata alla rete elettrica.

Confronto A5							
	GWP [KgCO2e]	ODP [KgCFC11e]	AP [KgSO2e]	EP [Kg(PO4)3e]	ADPE [kgSbe]	ADPF [MJ]	NW [m3]
CEB	2,07E+03	2,17E-08	5,04E-01	7,67E-06	0,00E+00	2,60E+03	7,34E-02
CHB	1,73E+03	1,82E-08	4,22E-01	6,42E-06	0,00E+00	2,17E+03	6,13E-02
DIFF. %	19,58%	19,58%	19,58%	19,58%	0,00%	19,58%	19,58%

61.

A fianco: tabella illustrativa dei risultati delle fasi A1,2,3 per i mattoni in terra (CEB), i mattoni in cemento (CHB) e la differenza percentuale dei primi rispetto ai secondi.

Avendo moltiplicato le emissioni del carburante diesel per il numero di chilowattora risultante dalla somma dei contributi dovuti alle lavorazioni ed agli spostamenti, la differenza percentuale risulta essere costante. Si ritiene giusto ed interessante indicarla oltre che avere quantificato le emissioni dovute alla fase di costruzione degli edifici oggetto di analisi.

La maggiore durata del cantiere e la maggiore complessità dell'edificio in terra cruda comporta un maggiore utilizzo di macchinari e di veicoli per gli spostamenti che, quando vengono considerati nell'analisi, portano ad avere emissioni maggiori. La maggior parte delle volte, le emissioni legate a questa fase risultano incidere molto poco sul risultato finale e questo caso, come si vedrà in seguito, non fa eccezione. Tenendo sempre presente il motivo che ha portato alla scelta di realizzare un edificio bioclimatico in terra cruda e soprattutto le motivazioni che stanno alla base di questo studio che lo confronta con un edificio che rappresenta lo standard attualmente più diffuso nel panorama dell'edilizia maliana, si ritiene che le maggiori emissioni dovute alla fase di cantiere possano rappresentare un compromesso necessario al raggiungimento di una maggiore sostenibilità ambientale complessiva, nonché una maggiore qualità, comfort e salubrità dell'edificio costruito.



62.

A fianco: edificio Kalan Deme. So ormai edificato e pronto ad essere rifinito.



6.

FASE DI USO

.Considerazioni iniziali ed esclusioni

.B4: fase di sostituzione

.Risultati e osservazioni

All'interno di uno studio LCA, ci si aspetta che la fase di uso abbia un'importanza preponderante rispetto alle altre. La somma delle emissioni dovute al consumo di energia durante la vita utile che si ipotizza per un edificio, infatti, risulta sempre essere molto maggiore rispetto all'energia consumata ed alle conseguenti emissioni delle fasi precedenti e successive, riferite alla lavorazione delle materie prime, alla costruzione dell'edificio ed alla fine del ciclo di vita della costruzione.

La fase di uso è formata da cinque moduli fondamentali che rappresentano le attività svolte durante la vita utile dell'edificio. Troviamo la fase di utilizzo vero e proprio dell'edificio, la fase di manutenzione, la fase di riparazione, la fase di sostituzione e la fase di ristrutturazione. Ciascuna di queste fasi è responsabile di costi ed emissioni che vanno ad influenzare in maniera decisiva il ciclo di vita di ogni edificio.

Per ragioni che si spiegheranno in questo capitolo, è stata presa la decisione di escludere da questa analisi le parti di utilizzo, manutenzione, ripristino e ristrutturazione. Il contributo di queste fasi può, senza dubbio, valere un'analisi a parte che approfondisca le emissioni e gli aspetti economici legati all'utilizzo dell'edificio ed ai consumi che ne derivano. Si forniscono, in questo studio, indicazioni sintetiche riguardo alla fase di utilizzo dell'edificio e derivanti da un calcolo preliminare del consumo di energia che si ipotizza necessaria per raffrescare gli ambienti e renderli confortevoli. Basandosi sulla scelta di includere il fattore energetico nella definizione dell'unità funzionale e su queste sommarie indicazioni, si crede possa essere ripreso, in futuro, l'approfondimento della valutazione della sostenibilità legata a queste fasi. Si ritiene, infatti, che questa fase possa giocare un ruolo fondamentale nel processo di accettazione e riscoperta della terra cruda come materiale da costruzione.

L'edificio Kalan Deme So che rappresenta il caso di studio, si propone di assicurare livelli di comfort interno accettabili attraverso l'utilizzo di mattoni in terra compressa accoppiati ad un design bioclimatico e senza l'utilizzo di impianti di climatizzazione. L'installazione di dispositivi per il raffrescamento dell'aria è la soluzione maggiormente diffusa per fare fronte alle elevate temperature che il clima desertico della zona comporta e nella maggior parte dei casi questi impianti risultano male dimensionati ed assolutamente energivori, arrivando a comportare consumi e conseguenti spese elevate ed a provocare frequenti tagli di corrente e blackout. Gli ambienti interni degli edifici, infatti, spesso risultano difficilmente abitabili e quindi inutilizzabili. Attraverso l'utilizzo di soluzioni bioclimatiche e l'utilizzo di un materiale dalle caratteristiche energetiche come la terra cruda si va a garantire una condizione di comfort accettabile e grazie alla quale sia possibile evitare l'installazione di impianti di climatizzazione ed i relativi costi legati ai consumi. Come già detto nei capitoli precedenti, la scelta di comparare l'edificio Kalan Deme So con un edificio che non adotta soluzioni bioclimatiche è stata valutata ed è risultata essere la più sensata in quanto un edificio non bioclimatico in terra cruda non avrebbe comportato quei vantaggi che si ritiene siano necessari per un rinnovato utilizzo di questo materiale e un edificio con soluzioni bioclimatiche in mattoni in cemento non è una soluzione che possa rappresentare la realtà locale, oltre a non garantire lo stesso livello di comfort e sostenibilità dei mattoni in terra cruda. Detto ciò, si ritiene che l'impatto della qualità del muro, nella valutazione dei consumi legati alla fase di uso dell'edificio, sia piccolo in rapporto all'impatto positivo delle soluzioni bioclimatiche adottate, motivo per cui, focalizzandosi questo studio sulla sostenibilità legata all'utilizzo del materiale terra cruda, si rimanda la quantificazione dei consumi e delle relative emissioni, che non vengono qui considerate.

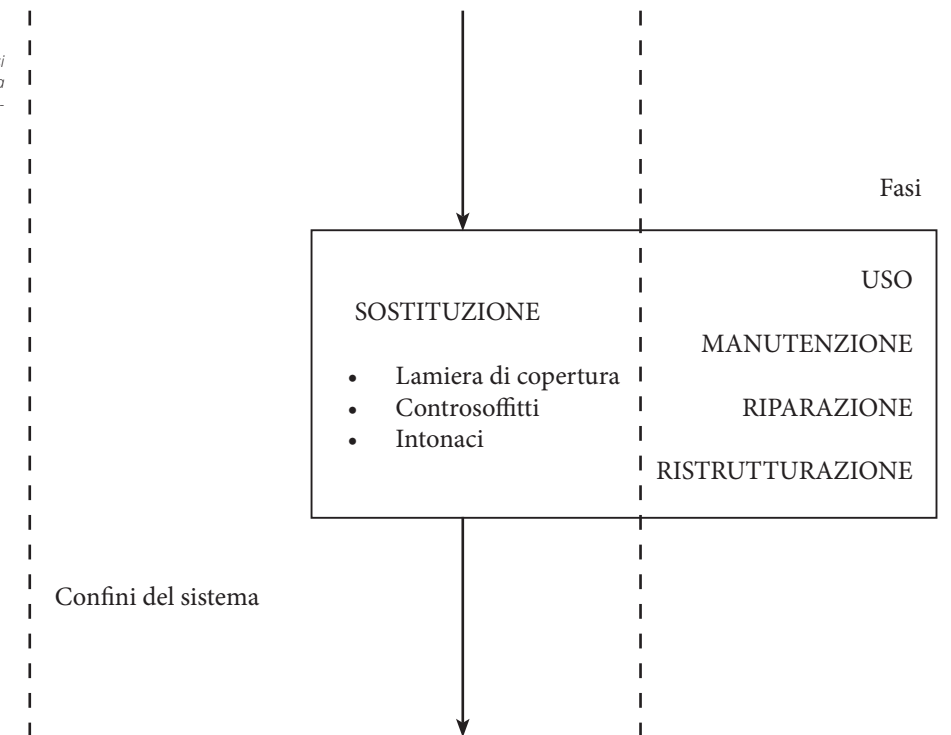
Per fornire un'indicazione sintetica su quello che l'utilizzo di soluzioni bioclimatiche può significare e per giustificare il loro utilizzo legato ad un rilancio della terra cruda come materiale da costruzione, si è eseguito un calcolo sintetico che possa fornire indicazioni di massima riguardo al risparmio di energia elettrica dell'edificio Kalan Deme So rispetto ad un edificio in cemento ed a parete singola, che richiederebbe l'installazione di impianti di climatizzazione per garantire un livello di comfort accettabile. Stabilendo questo livello di comfort intorno ai 26°C (fattore energetico considerato nella definizione dell'unità funzionale) ed ipotizzando che gli edifici abbiano le caratteristiche necessarie per l'installazione di condizionatori, si è calcolato un iniziale carico termico che questi impianti dovrebbero compensare. Seguendo le indicazioni fornite dal manuale ASHRAE e considerando la temperatura esterna, adattandola secondo i fattori di correzione forniti dal manuale, tenendo conto dell'orientamento dell'edificio e della massa delle pareti risulta che in consumi dell'edificio bioclimatico in terra risultano essere più bassi dell'80% rispetto a quelli di un edificio standard in mattoni forati in cemento.

Come già detto, questo risulta essere un calcolo sintetico ma si ritiene che possa fornire indicazioni interessanti sul motivo per cui si ritiene che l'accoppiamento di soluzioni bioclimatiche e terra cruda possa essere una soluzione credibile per raggiungere minori emissioni a livello ambientale attraverso una sostenibilità economica ed un maggior livello di comfort degli spazi interni degli edifici. Ritenendo che la fase di uso possa incidere pesantemente sulla sostenibilità ambientale ed economica a favore dell'edificio bioclimatico in terra cruda, ma ritenendo minore il contributo del materiale rispetto a quello delle soluzioni bioclimatiche, si esclude questa fase dalla presente analisi LCA, unitamente ai moduli B2, B3 e B5, sulle quali non si ritiene corretto formulare ipotesi che si calino in un contesto estremamente volatile come quello maliano, specialmente per quanto riguarda la manutenzione, la riparazione e l'eventuale ristrutturazione di edifici.

A fronte di queste esclusioni, si ritiene corretto inserire all'interno dell'analisi le emissioni dovute alla fase B4: quella di sostituzione. Le operazioni di sostituzione dei materiali danneggiati, infatti, vengono effettuate in edifici come scuole, cliniche ed edifici pubblici con una discreta regolarità, quando le condizioni iniziano a compromettere le funzioni e l'abitabilità degli edifici.

63.

A fianco: grafico rappresentante le fasi e le lavorazioni incluse o escluse dalla presente analisi in merito alle considerazioni precedentemente illustrate.



Considerando i dati ricavati dagli EPD ed osservando la cadenza degli interventi di sostituzione richiesti localmente, si è proceduto a calcolare le emissioni legate a questa fase. Entrando a far parte di questa analisi solamente i materiali e le lavorazioni che differenziano i due edifici anche questi risultati, come tutti gli altri risultati di questo studio, non sono da considerare in maniera assoluta, ma devono essere letti ai fini della comparazione fra i due edifici per valutare la loro sostenibilità ambientale e quella dei materiali che li contraddistinguono.

Assumendo una vita nominale degli edifici del valore di 50 anni si è calcolato il numero di sostituzioni che si prevede sarà necessario per ogni materiale come segue:

$$\text{Numero di sostituzioni} = (\text{Vita nominale edificio} / \text{Vita utile materiale}) - 1$$

La scarsa urbanizzazione, il clima rigido e l'entità degli agenti atmosferici (venti e piogge in particolare) che contraddistinguono tutta l'area saheliana fanno sì che il degrado dei materiali esposti all'esterno e che non sono dotati di una particolare resistenza vengano danneggiati fino a compromettere le funzioni e l'abitabilità degli edifici. In base ai dati ricavati dalle EPD e da quanto potuto osservare su luogo si stabiliscono le seguenti vite utili per materiali come: lamiera di copertura, controsoffitti ed intonaci.

Materials	Service Life	Replacements
Roof	25	1
Plaster	10	4
Countertop	10	4



64.

A fianco: tabella riassuntiva della vita utile dei materiali oggetto dell'analisi e del numero di sostituzioni previste nel corso della vita dell'edificio.

65.

A fianco: sopralluogo presso una clinica ospedaliera situata nelle vicinanze del cantiere di Dougourakoro. La clinica è il tipico esempio di edificio in mattoni forati in cemento (CHB). Si è provveduto alla sostituzione di intonaci, controsoffitti e lamiera di copertura, elementi che erano fortemente danneggiati e non riuscivano più ad impedire l'ingresso dell'acqua negli spazi interni che, in vista della stagione delle piogge, non sarebbero stati più sufficientemente salubri.



66.

A fianco: dettaglio del controsoffitto danneggiato. Le numerose infiltrazioni d'acqua compromettono la tenuta e la funzione di questi elementi.

67.

A fianco: tabella illustrativa dei risultati della fase B4 per i mattoni in terra (CEB), i mattoni in cemento (CHB) e la differenza percentuale dei primi rispetto ai secondi.

Replacement Stage - B4							
	GWP [KgCO2e]	ODP [KgCFC11e]	AP [KgSO2e]	EP [Kg(PO4)3e]	ADPE [kgSbe]	ADPF [MJ]	NW [m3]
CEB	1,20E+04	2,21E-07	4,09E+01	3,63E+00	9,24E-01	1,38E+05	5,65E+01
CHB	2,82E+04	7,21E-04	7,93E+01	2,94E+01	9,41E-01	3,40E+05	1,26E+02
DIFF. %	-57,53%	-99,97%	-48,36%	-87,65%	-1,80%	-59,49%	-55,09%

Osservando i risultati della fase di sostituzione (B4) si può notare come l'utilizzo di controsoffitti ed intonaci vada ad influenzare negativamente le emissioni dell'edificio in cemento. Per l'edificio in terra, dato il design bioclimatico, sono state adottate soluzioni differenti che garantiscono una maggiore durabilità, anche se, come si è precedentemente visto, i costi di produzione e costruzione risultano essere inizialmente più alti. La scelta di utilizzare materiali locali, inoltre potrebbe abbattere le emissioni dovute alla sostituzione dell'edificio in mattoni forati in cemento, essendo la fase di trasporto "dal cancello al sito" considerata all'interno delle emissioni del modulo B4.

La lamiera utilizzata come copertura è largamente disponibile sul mercato maliano, visto il suo utilizzo estremamente diffuso proprio come elemento di copertura. Queste lamiere vengono, però, importate dall'Europa o dalla Cina e conseguentemente dal Senegal, contribuendo a loro volta alle emissioni dovute all'utilizzo di questo materiale.



68.

A fianco: dettaglio rappresentante l'intonaco danneggiato dall'umidità dovuta alle infiltrazioni della pioggia attraverso la lamiera di copertura.

69.

Sopra: fase di sostituzione della lamiera e del controsoffitto presso la clinica ospedaliera nelle vicinanze del cantiere, a Dougourakoro.





7.

FASE DI FINE DEL CICLO DI VITA

.Inquadramento

.C1 e C2: demolizione e trasporto

.Flusso dei materiali

.C3 e C4: trattamento dei rifiuti e discarica

.Risultati e osservazioni

Nella fase di fine del ciclo di vita vengono raccolti i dati relativi alla demolizione (fase C1), al trasporto delle macerie presso le discariche o presso i centri di trattamento dei rifiuti (fase C2), al trattamento dei rifiuti (fase C3) oppure al loro stoccaggio in discarica (fase C4). La fase di fine del ciclo di vita, è una parte dello studio LCA specialmente delicata e difficile visto che, per un edificio appena costruito o addirittura in fase di progettazione, è necessario fare ipotesi su operazioni che saranno svolte in futuro e quindi soggette ad elevate incertezze. Per ogni fase che forma il modulo C si sono ipotizzati scenari che possano risultare credibili e coerenti con la realtà maliana. L'adattamento del metodo secondo le situazioni ed le consuetudini locali, risulta necessario e fondamentale per non arrivare a conclusioni non veritiere o semplicistiche. In questo capitolo si presenteranno, perciò, gli aspetti che si ritengono rilevanti per potere comprendere e validare le ipotesi che vengono fatte riguardo la fine del ciclo di vita degli edifici analizzati e dei loro materiali. Successivamente si presenteranno i risultati conseguenti a tali ipotesi ed i risultati del modulo C. Si sottolinea fin da ora come, essendo le incidenze delle singole fasi sul risultato finale dello studio LCA estremamente basse, si sono valutate singolarmente e si presenteranno le ipotesi fatte per ogni fase, ma i risultati verranno presentati accorpando tutte le fasi in un unico modulo, che sarà chiamato modulo C. Nel capitolo successivo, dove verranno presentati i risultati totali, sarà possibile verificare le incidenze percentuali dei singoli moduli, così da validare quanto appena detto.

INQUADRAMENTO

Come illustrato nei capitoli iniziali di questo elaborato di tesi, la grande instabilità geopolitica del Mali, ha portato negli ultimi anni a massivi movimenti migratori sia verso altre realtà come stati europei, sia verso zone più stabili della zona saheliana (Senegal e Algeria), ma anche verso realtà più sicure e meno isolate rispetto al nord del paese, come la capitale Bamako. Questo fattore, unito ad un costante incremento del numero delle nascite, ha portato, come già illustrato, ad una crescente domanda abitativa in capitale, che ha visto una costante e rapida espansione assolutamente non gestita e pianificata, ma ha causato anche il repentino abbandono di intere zone del Mali. Per quanto riguarda queste zone, dunque, le attività di demolizione e più in generale la fase di fine del ciclo di vita nel suo complesso, non possono essere prese in considerazione, in quanto gli edifici vengono completamente abbandonati rapidamente al sopraggiungere di conflitti o di situazioni non sopportabili, come il fenomeno dell'avanzamento della desertificazione. Focalizzandosi sulla realtà di Bamako e dei villaggi situati nei pressi della capitale, come Dougourakoro, si è potuto notare come l'abbandono degli edifici non più utilizzati, principalmente perché non più abitabili, sia una prassi estremamente diffusa. Questo fatto è certamente da attribuirsi all'assenza di strutture e normative che siano in grado di regolamentare e gestire lo smaltimento dei rifiuti. Anche per quanto riguarda i rifiuti prodotti quotidianamente, infatti, quando questi vengono smaltiti, lo si fa attraverso l'incenerimento lungo le strade o in discariche a cielo aperto, che altro non sono che giganteschi cumuli di rifiuti. Valendo ciò per i rifiuti prodotti quotidianamente, il trattamento delle macerie provenienti dalla demolizione di edifici non risulta possibile e lo stesso stoccaggio in discarica è di difficile attuazione e di dubbia utilità. In tutto lo stato, perciò l'abbandono degli edifici, anche se dovuto a diverse motivazioni è l'unico modo in cui risulta possibile gestire la fase di fine di vita di un edificio.



70.

Sopra: scena di vita quotidiana per le strade di Bamako. L'assenza di un sistema di gestione e raccolta dei rifiuti provoca un abbandono incontrollato della spazzatura. Questo problema viene affrontato incenerendo la spazzatura prodotta quotidianamente e che può essere incenerita. Questo discorso non può valere per le macerie delle opere edili. (Photo credits to Michele Cattani)

71.

A fianco: vista di Bamako al crepuscolo dal centrale fiume Niger. Si possono notare i fumi dovuti all'incenerimento dei rifiuti, operazione che viene svolta quotidianamente al calare del sole in tutta la città.



Nonostante quanto appena esposto, si ritiene di grande interesse ricercare un possibile scenario di fine vita dell'edificio, che prenda in considerazione le fasi di demolizione, trasporto e trattamento delle macerie e smaltimento in discarica e che le vada a declinare adattandole alla realtà maliana. Si ribadisce che quanto segue è il frutto di ipotesi che si ritengono assolutamente possibili. Questo non vale solo per quanto riguarda la realtà maliana ma in generale per la fase di fine vita all'interno di analisi di edifici appena costruiti o ancora da costruire.

A fronte di una condizione di estrema povertà ed assenza di strutture per gestire diverse situazioni che in altre realtà vengono date per scontate (come la gestione dei rifiuti), lo scenario maliano offre diversi spunti interessanti riguardo alla capacità di ottimizzare qualsiasi tipo di risorsa a disposizione e di creare oggetti di uso comune e non, attraverso il riutilizzo di materiali considerati ormai dismessi. Queste realtà si presentano affiancando nella vita di tutti i giorni la tragicità dovuta all'estrema povertà che caratterizza questo paese e proprio in funzione delle capacità locali si andranno a formulare le ipotesi che guideranno lo studio della fase di fine del ciclo di vita di questo studio LCA.

72.

A fianco: veduta aerea di una parte di una discarica a cielo aperto di Bamako. Queste discariche risultano essere sterminate e, nonostante ne vengano costantemente incenerite alcune porzioni, risultano aumentare continuamente le loro dimensioni. (Photo credits to Michele Cattani)





73.

A fianco: le fasce più povere della popolazione maliana si vedono ridotte a recarsi regolarmente presso le discariche a cielo aperto per cercare rifiuti che sia possibile riutilizzare o rivendere.
(Photo credits to Michele Cattani)

Pur non essendo un uso diffuso, si reputa probabile e credibile che, alla fine della vita utile dell'edificio considerato, stimata in 50 anni di durata, questo verrà demolito. Rimandando la discussione del destino delle macerie ottenute dalle opere di demolizione, si è ipotizzato che questa avvenga, così come la maggior parte delle opere di costruzione, in maniera manuale, con l'utilizzo di strumenti come mazzette e picconi e con l'utilizzo di un martello pneumatico come macchinario meccanizzato. Si ipotizza ciò, anche in base all'osservazione delle lavorazioni che hanno preceduto l'inizio della costruzione della scuola di Dougourakoro. Lo zoccolo e le fondazioni erano, infatti, già presenti quando il progettista ha ricevuto l'incarico dal cliente e, in conseguenza del design che caratterizza l'edificio, è stato necessario intervenire per modificare le dimensioni del cordolo inferiore e dei pilastri. Durante questa fase, tutte le lavorazioni di demolizione sono state svolte in maniera manuale e senza l'ausilio di strumenti meccanizzati. Si ritiene, dunque, credibile l'ipotesi che anche i lavori di demolizione finale siano svolti principalmente attraverso lavorazioni manuali. Le emissioni del martello demolitore, sempre alimentato a gasolio, sono state comunque prese in considerazione all'interno del modulo C1, valutando il suo utilizzo per 5 ore al giorno per 10 giorni di utilizzo.



74.

A fianco: fase di demolizione dello zoccolo di basamento della scuola di Dougourakoro. Questa fase è stata caratterizzata solamente da lavorazioni manuali.



75.

Sopra: esempio di demolizione manuale. In base all'esperienza in loco di chi scrive, si è assunto che la fase di demolizione alla fine del ciclo di vita degli edifici verrà svolta prevalentemente attraverso lavorazioni di questo tipo.

Ipotizzando una durata dei lavori di demolizione di 30 giorni per la scuola in mattoni in terra compressa e di 20 per quella in mattoni forati in cemento, si precisa che nel calcolo delle emissioni dovute a questa fase si siano incluse quelle dovute agli spostamenti degli operai addetti ai lavori. Come per la fase di costruzione, la distanza presa in considerazione per questo calcolo è di 27 km, lunghezza del percorso fino a Bamako. I mezzi di trasporto e le emissioni del carburante a cui si fa riferimento corrispondono a quelle già illustrate nella fase di costruzione (modulo A5). L'incidenza di queste emissioni sui risultati finali dello studio LCA arriva ad essere inferiore all'1% e perciò ad essi si accorpano anche i risultati della fase di trasporto delle macerie. Per la fase di trasporto dei rifiuti (rappresentata dal modulo C2), si è utilizzata la stessa formula usata per valutare la potenza espressa dal camion per il trasporto dei materiali nel modulo A4. Si ipotizza che, vista la realtà di villaggio di agricoltori che caratterizza Dougourakoro, tutti i rifiuti vengano trasportati almeno fino a Bamako, qualunque siano le previsioni che si faranno per quanto riguarda la loro destinazione finale ed il loro smaltimento. Si presentano, di seguito, i risultati di queste prime due fasi che vanno ad influire minimamente sul risultato finale ma che si ritiene utile illustrare in vista dei paragrafi successivi riguardanti il trattamento dei rifiuti.

Demolition and Transport - C1+C2							
	GWP [KgCO2e]	ODP [KgCFC11e]	AP [KgSO2e]	EP [Kg(PO4)3e]	ADPE [kg5be]	ADPF [MJ]	NW [m3]
CEB	4,15E+02	4,35E-09	1,01E-01	1,54E-06	0,00E+00	5,21E+02	1,47E-02
CHB	3,71E+02	3,89E-09	9,03E-02	1,38E-06	0,00E+00	4,66E+02	1,31E-02
DIFF. %	11,72%	11,72%	11,72%	11,72%	0,00%	11,72%	11,72%

76.

Sopra: tabella illustrativa dei risultati delle fasi C1 e C2 per i mattoni in terra (CEB), i mattoni in cemento (CHB) e la differenza percentuale dei primi rispetto ai secondi.

Le maggiori emissioni dell'edificio in terra corrispondono alla maggiore durata dei lavori di demolizione, dovuta alla maggiore complessità dell'edificio ed alla maggiore quantità di materiale utilizzato per la sua costruzione. Come già detto, non ci si sofferma su questi dati in quanto la loro incidenza sul risultato totale finale risulta essere estremamente bassa.

FLUSSO DEI MATERIALI

Prima di procedere alla valutazione degli impatti dovuti ai moduli C3 e C4, è importante fare riferimento a ciò che si è ipotizzato per quanto riguarda il flusso dei materiali risultanti dalle operazioni di demolizione. Queste considerazioni vanno ad influenzare i dati che seguiranno ma anche quelli appena presentanti e si ritiene, perciò, importante illustrarle ora.

Dei materiali che ci ritrova ad avere in seguito alla demolizione di un edificio, solo una parte viene smaltita in discarica. Il resto può essere riutilizzato o riciclato. Per riutilizzo si intende un reimpiego del materiale così come si presenta dopo la demolizione, senza alcuna lavorazione o trattamento. Questi materiali vengono esclusi dalla fase di trasporto calcolata nel paragrafo precedente, in quanto questa fase si ritiene essere un input del sistema o ciclo di vita successivo che ne farà uso. Quando si fa riferimento a materiali che dovranno essere riciclati, ci si riferisce a quei materiali che necessitano di specifiche lavorazioni prima di poter essere impiegati nuovamente. Queste lavorazioni possono restituire un materiale con prestazioni e destinazione d'uso uguali a quello precedente o un materiale degradato rispetto a quello originale, ma utilizzabile per altre funzioni, così da evitarne la dismissione in discarica. Questa differenza non è stata considerata in questo studio, essendo che la distanza da un eventuale sito di lavorazione si ipotizza essere la stessa (distanza da Bamako) e la percentuale di materiale riciclato è stata combinata con le emissioni al kg di ogni materiale all'interno del modulo C3, facente riferimento alle lavorazioni necessarie per il trattamento dei rifiuti. La percentuale di materiale che non viene né riutilizzata, né riciclata, viene dismessa in discarica e le emissioni dovute a questa parte di materiali vengono analizzate nel modulo C4.

Nonostante in Mali queste operazioni non avvengano secondo le metodologie europee e non siano minimamente normate, la grande scarsità di risorse e la necessità di soddisfare i propri bisogni portano a nuovi usi dei materiali, come testimoniato dall'esperienza della costruzione di una pressa per la produzione di mattoni in terra compressa (CEB) utilizzando scarti metallici di varia provenienza. Questo risulta essere solo un esempio del possibile riutilizzo o riciclo di determinati materiali che si ha localmente ogni giorno.



77.

A fianco: scarti di ferraglie raccolti e modellati per la costruzione di una pressa CINVA RAM per la produzione di mattoni in terra compressa (CEB). Si ritiene che questo possa essere un esempio di riciclaggio di un materiale, ovviamente declinato secondo la possibile accezione locale del termine.



78.

A fianco: mattone in terra compressa (CEB) modellato con la pressa CINVA RAM costruita con i pezzi della foto sopra.

79.

A fianco: giochi per bambini realizzati con scarti provenienti dai più svariati oggetti oramai non più utilizzabili. In base a queste esperienze ed alla letteratura al riguardo, si è ipotizzato un flusso dei materiali risultanti dalla demolizione degli edifici oggetto di studio.



Per ogni materiale si sono, dunque, valutate le eventuali percentuali di riuso e di riciclo, considerando le rimanenti quantità destinate alla dismissione in discarica.

Si ritiene di aver agito in maniera credibile in questa analisi, provando a rendere lo studio LCA coerente con la realtà locale, per garantire una coerenza ed una solidità dei risultati, così che questi possano fornire indicazioni appropriate che portino a conclusioni corrette. Se per l'acciaio, sia strutturale che non, è facile immaginare un'alta percentuale di riciclo, una breve osservazione la meritano il calcestruzzo ed i mattoni. Questi, infatti, attraverso un'operazione di frantumazione che si ipotizza possa essere svolta manualmente risultano avere una percentuale di materiale destinabile ad un nuovo uso.

La parte di ghiaia presente nel calcestruzzo, si ipotizza che possa essere riutilizzata come aggregato di inferiore qualità. Essendo che il calcestruzzo è ottenuto aggiungendo 2 carriole di ghiaia ed 1 carriola di sabbia ogni 7 sacchi di cemento e sapendo che un sacco di cemento pesa 50 kg e che un carriola ha una capacità di 60 lt, la percentuale di ghiaia nel calcestruzzo risulta essere di circa il 60%. A seguito delle operazioni di frantumazione, si prende questa percentuale come possibile quota di riciclo degli aggregati che compongono il calcestruzzo ed i mattoni forati in cemento. Il cemento si ipotizza destinato alla discarica nella sua interezza.

Per quanto riguarda i mattoni in terra compressa, come già accennato nei capitoli introduttivi, una volta stabilizzati con una percentuale di cemento (che nel caso del progetto Kalan Deme So è stata fissata dagli ingegneri maliani al 7%), si vanno a creare tre componenti: una parte di cemento vera e propria, una parte di argilla cementificata dovuta alle reazioni di idratazione del cemento ed una parte di terra "verGINE". Attraverso le ipotetiche operazioni di frantumazione si vanno a separare queste parti, destinando alla discarica la parte di cemento e considerando l'argilla cementificata riutilizzabile come aggregato e la parte di terra vergine come tale. In seguito si rappresentano in tabella i risultati ricavati dalle assunzioni appena presentate. Si sottolinea come fin dall'inizio i mattoni ed il calcestruzzo siano stati "spacchettati". La percentuale di cemento destinato alla discarica si trova, quindi, all'interno della quantità di cemento, la parte di ghiaia all'interno della voce "aggregati" e la terra viene considerata riciclabile interamente, in base alle assunzioni appena presentate.

CEB							
	Weight		Reuse Rate	W Reuse	Recycling Rate	W Recycle	W Waste
AGGREGATES	79867,10	[kg]	0,00%	0	60,00%	47920,26	31946,84
CEMENT	17768,14	[kg]	0,00%	0	0,00%	0	17768,14
EARTH	42996,23	[kg]	0,00%	0	100,00%	42996,225	0,00
NON STRUCTURAL STEEL	2470,00	[kg]	0,00%	0	90,00%	2223	247,00
STRUCTURAL STEEL	4483,17	[kg]	10,00%	448,317402	85,00%	3810,69792	224,16

CHB							
	Weight		Reuse Rate	W Reuse	Recycling Rate	W Recycle	W Waste
AGGREGATES	110661,44	[kg]	0,00%	0,00	60,00%	66396,86	44264,58
CEMENT	17768,14	[kg]	0,00%	0,00	0,00%	0,00	17768,14
COUNTERTOP	1795,47	[kg]	0,00%	0,00	20,00%	359,0944	1436,38
NON STRUCTURAL STEEL	2375,00	[kg]	0,00%	0,00	90,00%	2137,5	237,50
PLASTER	5444,01	[kg]	0,00%	0,00	0,00%	0	5444,01
STRUCTURAL STEEL	1153,20	[kg]	10,00%	115,32	85,00%	980,22	57,66

Le quantità risultanti dalle operazioni di riciclo e di dismissione in discarica sopra riportate, vengono moltiplicate rispettivamente per le emissioni relative ai moduli C3 e C4 che sono state ricavate dalle dichiarazioni ambientali dei prodotti (EPD) reattive ai materiali utilizzati ed organizzate in fogli di dati manualmente, tramite l'utilizzo del software Microsoft Excel. Avendo scelto di utilizzare esclusivamente risorse disponibili gratuitamente per effettuare la ricerca, alcuni dati riguardanti queste fasi potrebbero essere incompleti, in quanto non sempre le informazioni sono disponibili in maniera completa. Si rimanda ad ulteriori approfondimenti ed all'utilizzo di eventuali risorse più complete la ricerca dei dati mancanti.

Emissions/kg- Stage C3							
Material	GWP [KgCO2e/kg]	ODP [KgCFC11e/kg]	AP [KgSO2e/kg]	EP [Kg(PO4)3e/kg]	ADPE [kgSbe/kg]	ADPF [MJ/kg]	NW [m3/kg]
Aggregates	6,726E-03	3,810E-17	4,350E-05	7,401E-06	3,614E-09	1,090E-01	2,865E-05
Cement	1,890E-03	8,980E-15	1,480E-05	3,010E-06	3,230E-09	3,500E-02	0,000E+00
Countertop	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Earth	3,378E-03	1,964E-17	1,225E-05	3,050E-06	5,500E-10	2,310E-02	3,985E-06
Non Structural Steel	1,234E-03	3,495E-15	3,566E-06	4,073E-07	3,230E-09	3,500E-02	0,000E+00
Plaster	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Structural Steel	1,234E-03	3,495E-15	3,566E-06	4,073E-07	3,230E-09	3,500E-02	0,000E+00

Emissions/kg- Stage C4							
Material	GWP [KgCO2e/kg]	ODP [KgCFC11e/kg]	AP [KgSO2e/kg]	EP [Kg(PO4)3e/kg]	ADPE [kgSbe/kg]	ADPF [MJ/kg]	NW [m3/kg]
Aggregates	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Cement	4,810E-03	4,920E-15	2,680E-05	3,900E-06	1,700E-09	6,260E-02	0,000E+00
Countertop	1,304E-02	1,304E-14	8,043E-05	1,087E-05	4,783E-09	1,739E-01	3,478E-05
Earth	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Non Structural Steel	1,770E-03	1,628E-15	9,558E-06	1,301E-06	5,779E-10	2,124E-02	4,106E-06
Plaster	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
Structural Steel	1,770E-03	1,628E-15	9,558E-06	1,301E-06	5,779E-10	2,124E-02	4,106E-06

80.

A fianco: tabelle riassuntive del flusso dei materiali dopo la demolizione dell'edificio. La percentuale di riuso e di riciclo ipotizzate vengono combinate coi quantitativi iniziali e ciò che non rientra in questi processi viene destinato alla discarica.

Waste Processing and Disposal - C3+C4							
	GWP [KgCO2e]	ODP [KgCFC11e]	AP [KgSO2e]	EP [Kg(PO4)3e]	ADPE [kgSbe]	ADPF [MJ]	NW [m3]
CEB	8,20E+02	3,42E-10	4,77E+00	8,56E-01	4,26E-04	1,18E+04	2,47E+00
CHB	1,00E+03	4,14E-10	6,37E+00	1,19E+00	5,48E-04	1,57E+04	3,50E+00
DIFF. %	-18,35%	-17,28%	-25,04%	-28,04%	-22,37%	-24,94%	-29,52%

82.

Sopra: tabella illustrativa dei risultati delle fasi C3 e C4 per i mattoni in terra (CEB), i mattoni in cemento (CHB) e la differenza percentuale dei primi rispetto ai secondi.

I risultati mostrano un vantaggio a livello di sostenibilità ambientale dell'edificio in terra cruda, dovuto principalmente ad una minore quantità di cemento utilizzato ed all'utilizzo di materiali con una maggiore possibilità di riciclo. Questi dati sono da leggere in funzione delle ipotesi fatte, precedentemente esposte ed attraverso le quali si è andato ad adattare lo studio LCA alla realtà maliana che, particolarmente in questa fase dello studio, risulta essere profondamente differente da quelle in cui solitamente viene svolto uno studio di questo tipo.

Si accenna anche ad un potenziale livello di emissioni pari a zero di un mattone composto interamente di terra cruda in quanto, giunto alla fine della sua vita utile durante la quale si ipotizza essere stato trattato solo con vernice idrorepellente che si deteriora col tempo, esso tornerebbe ad essere lo stesso materiale che è stato estratto durante le fasi iniziali del ciclo di vita. Si accenna a questo come spunto per eventuali studi di interesse personale riguardo al tema della terra cruda e del suo utilizzo come materiale da costruzione, senza volere, con ciò, trarre eventuali conclusioni all'interno di questo studio da questa osservazione.

Al di fuori dei confini del sistema viene collocato il modulo D, relativo ai vantaggi associati ai materiali provenienti dalle operazioni di riciclo e riuso. Essendo che questi contributi non vengono considerati nella presentazione dei risultati finali dello studio LCA, si rimanda la loro valutazione e presentazione, non influenzando questi sulle conclusioni finali dello studio.

81.

A fianco: tabelle rappresentanti le emissioni al kg relative ai moduli C3 e C4. Queste emissioni sono state ricavate dalle EPD dei materiali e rese fruibili attraverso l'organizzazione in fogli di calcolo con l'utilizzo del software Microsoft Excel. Alcuni dati risultano mancanti a causa della limitatezza delle risorse opensource utilizzate.



8.

RISULTATI FINALI E CONCLUSIONI

*.Risultati LCA
.Conclusioni*

Presentate le fasi che compongono questo studio LCA ed il metodo con cui sono stati valutati i loro effetti, si procede alla presentazione dei risultati complessivi per ogni categoria d'impatto considerata, discutendone i risultati finali. Una aggiuntiva fase di weighting, tradotto in italiano come "pesatura", permetterebbe di fornire un unico indice per tutte le categorie di impatto, semplificando la presentazione grazie alle priorità date da diversi metodi di pesatura alle differenti categorie d'impatto. Essendo questa fase altamente soggettiva, viene definita facoltativa dagli standard internazionali e si procede, dunque, alla presentazione dei risultati delle singole categorie d'impatto, così da avere una visione dettagliata del lavoro svolto.

In seguito si esporranno le conclusioni alle quali questi risultati hanno portato e che sono emerse nel corso di questo studio in ogni sua fase, dalla raccolta dati alla stesura finale. Un breve paragrafo finale viene dedicato ai limiti che si sono incontrati durante questo studio ed agli sviluppi futuri che si crede questa ricerca possa avere per fornire risultati maggiormente approfonditi e per arrivare a conclusioni ulteriormente interessanti e fondate. Si ricorda dell'esclusione da questo studio delle emissioni dovute alla fase di uso, che andrebbero ad avere un'alta incidenza sul risultato finale rispetto a tutte le altre. Rimandando lo studio ambientale ed economico di questa fase, si ritiene giusto sottolineare come i seguenti risultati abbiano valore comparativo fra i due edifici e riguardino esclusivamente le fasi del loro ciclo di vita trattate in questo studio.

Stage	GWP [kgCO2e]				
	CEB	%	CHB	%	DIFF %
A1-2-3	2,633E+04	71,4%	2,229E+04	52,8%	18,1%
A4	1,40E+03	3,8%	1,66E+03	3,9%	-15,5%
A5	2,07E+03	5,6%	1,73E+03	4,1%	19,6%
B4	5,83E+03	15,8%	1,51E+04	35,9%	-61,4%
C1	2,75E+02	0,7%	2,38E+02	0,6%	15,3%
C2	1,40E+02	0,4%	1,33E+02	0,3%	5,3%
C3	7,25E+02	2,0%	7,83E+02	1,9%	-7,5%
C4	9,56E+01	0,3%	2,21E+02	0,5%	-56,8%
TOTAL	3,69E+04		4,22E+04		-13%

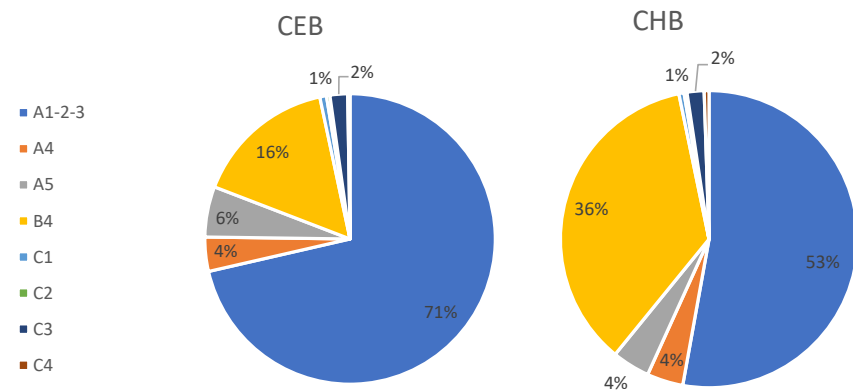
83.

A fianco: tabella rappresentante i risultati finali del Global Warming Potential (GWP). Per ogni edificio, sono indicati i contributi delle singole fasi, illustrati nei capitoli precedenti e la loro incidenza percentuale sul risultato finale, accompagnati dalla differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici per ogni fase.

85.

A fianco: tabella rappresentante i risultati finali del Ozone Depletion Potential (ODP). Per ogni edificio, sono indicati i contributi delle singole fasi, illustrati nei capitoli precedenti e la loro incidenza percentuale sul risultato finale, accompagnati dalla differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici per ogni fase.

Stage	ODP [kgCFC11e]				
	CEB	%	CHB	%	DIFF %
A1-2-3	2,670E-06	94,7%	2,093E-04	33,2%	-98,7%
A4	1,47E-08	0,5%	1,74E-08	0,0%	-15,5%
A5	2,17E-08	0,8%	1,82E-08	0,0%	19,6%
B4	1,08E-07	3,8%	4,20E-04	66,8%	-100,0%
C1	2,88E-09	0,1%	2,50E-09	0,0%	15,3%
C2	1,47E-09	0,1%	1,39E-09	0,0%	5,3%
C3	1,88E-10	0,0%	1,82E-10	0,0%	3,3%
C4	1,55E-10	0,0%	2,32E-10	0,0%	-33,4%
TOTAL	2,82E-06		6,30E-04		-100%

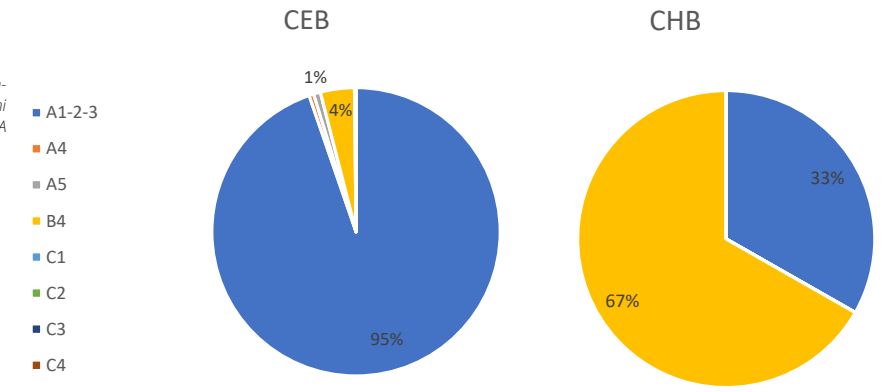


84.

A fianco: grafici a torta rappresentanti le incidenze percentuali di ogni fase considerata nello studio LCA sull'emissione totale finale.

86.

A fianco: grafici a torta rappresentanti le incidenze percentuali di ogni fase considerata nello studio LCA sull'emissione totale finale.



L'impatto sul potenziale di riscaldamento globale dell'edificio bioclimatico realizzato con mattoni in terra cruda compressa (CEB) risulta essere minore rispetto a quello costruito con mattoni forati in cemento (CHB). La percentuale di scostamento fra i due edifici non si crede sia sufficientemente alta da potere fare valere ragioni ambientali rispetto a ragioni economiche legate al costo più alto del materiale e delle lavorazioni dell'edificio in terra cruda. Andando ad osservare l'incidenza delle singole fasi esposte nei capitoli precedenti sul risultato finale, si nota come per entrambi gli edifici, ma specialmente per quello in terra cruda, i moduli A1, A2 ed A3 abbiano un'importanza preponderante. Riprendendo quanto osservato nell'analisi e nell'esposizione dei risultati relativi a questa fase, risulta evidente il potenziale ambientale inespresso della terra cruda come materiale da costruzione, fortemente limitato da quello che si ritiene un uso eccessivo del cemento, che va ad influenzare in modo inequivocabile quello che dovrebbe essere un edificio caratterizzato dalla terra cruda. Le ragioni di ciò, sono da ricercare in fattori sociali legati sia all'opinione comune dell'utilizzo della terra come materiale da costruzione, sia alla limitata diffusione delle conoscenze, delle tecniche e dei macchinari necessari per l'utilizzo di questo materiale.

La riduzione dello strato di ozono (ODP) viene influenzata in maniera fortemente differente dai due edifici. Anche in questo caso, l'importanza a livello di contributo, dei moduli A1, A2 ed A3 è altissima per quanto riguarda l'edificio in terra. Si possono ritenere, perciò, valide le osservazioni appena espresse. Per quanto riguarda l'edificio in mattoni forati in cemento (CHB), l'importanza della fase di sostituzione è da collegare ai moduli A1, A2 ed A3 e quindi all'estrazione ed alla lavorazione delle materie prime. Il modulo B4, infatti, è stato calcolato valutando il numero di sostituzioni necessarie durante la vita dell'edificio e moltiplicando per questo valore le emissioni dovute alle fasi di produzione e trasporto al sito dei materiali da sostituire.

Stage	AP [KgSO2e]				
	CEB	%	CHB	%	DIFF %
A1-2-3	6,806E+01	72,6%	6,046E+01	55,1%	12,6%
A4	3,42E-01	0,4%	4,04E-01	0,4%	-15,5%
A5	5,04E-01	0,5%	4,22E-01	0,4%	19,6%
B4	2,00E+01	21,3%	4,20E+01	38,3%	-52,5%
C1	6,68E-02	0,1%	5,80E-02	0,1%	15,3%
C2	3,41E-02	0,0%	3,24E-02	0,0%	5,3%
C3	4,27E+00	4,6%	5,10E+00	4,6%	-16,2%
C4	5,00E-01	0,5%	1,27E+00	1,2%	-60,6%
TOTAL	9,37E+01		1,10E+02		-15%

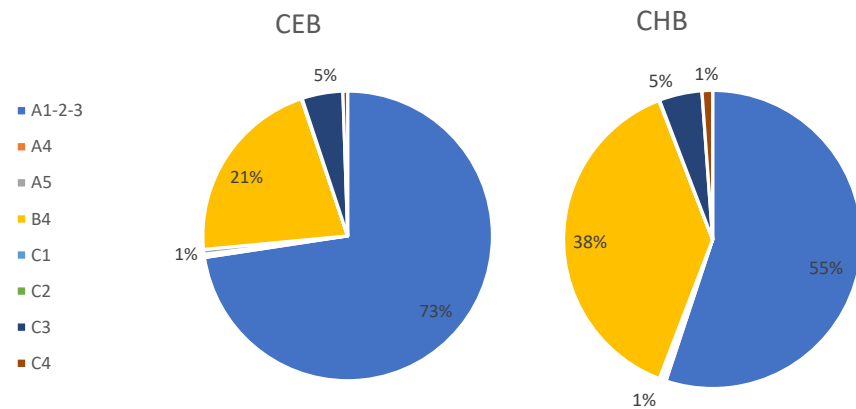
87.

A fianco: tabella rappresentante i risultati finali del Acidification Potential (AP). Per ogni edificio, sono indicati i contributi delle singole fasi, illustrati nei capitoli precedenti e la loro incidenza percentuale sul risultato finale, accompagnati dalla differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici per ogni fase.

89.

A fianco: tabella rappresentante i risultati finali del Eutrophication Potential (EP). Per ogni edificio, sono indicati i contributi delle singole fasi, illustrati nei capitoli precedenti e la loro incidenza percentuale sul risultato finale, accompagnati dalla differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici per ogni fase.

Stage	EP [kg(PO4)3e]				
	CEB	%	CHB	%	DIFF %
A1-2-3	6,499E+00	71,2%	7,80E+00	30,6%	-16,7%
A4	5,20E-06	0,0%	6,16E-06	0,0%	-15,5%
A5	7,67E-06	0,0%	6,42E-06	0,0%	19,6%
B4	1,77E+00	19,4%	1,65E+01	64,8%	-89,3%
C1	1,02E-06	0,0%	8,83E-07	0,0%	15,3%
C2	5,19E-07	0,0%	4,93E-07	0,0%	5,3%
C3	7,79E-01	8,5%	8,76E-01	3,4%	-11,1%
C4	7,72E-02	0,8%	3,13E-01	1,2%	-75,4%
TOTAL	9,12E+00		2,55E+01		-64%

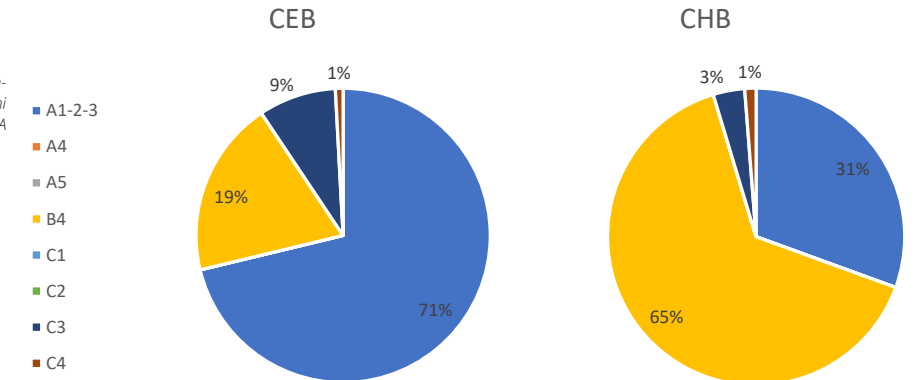


88.

A fianco: grafici a torta rappresentanti le incidenze percentuali di ogni fase considerata nello studio LCA sull'emissione totale finale.

90.

A fianco: grafici a torta rappresentanti le incidenze percentuali di ogni fase considerata nello studio LCA sull'emissione totale finale.



Anche per questo indicatore, le fasi di estrazione e produzione dei materiali risultano essere le maggiormente impattanti. L'utilizzo di materiali come acciaio e cemento e le loro lavorazioni influiscono in maniera determinante sul potenziale di acidificazione di suolo ed acque. I dati ricavati dalle certificazioni EPD indicano un'incidenza minima rispetto al totale ma non trascurabile delle fasi di trattamento dei rifiuti durante la fase di riciclo. La maggiore sostenibilità dell'edificio in terra viene confermata anche secondo questo indicatore e si pone nuovamente la riflessione secondo la quale un maggiore contenimento dell'uso del cemento potrebbe migliorare ulteriormente le prestazioni dell'edificio in terra cruda.

L'analisi restituisce un risparmio oltre il 60% delle emissioni provocanti l'eutrofizzazione delle alghe e la seguente compromissione della biodiversità. L'uso di materiale locale, che evita lunghi spostamenti dovuti al trasporto dei materiali, è da tenere in considerazione per limitare queste emissioni, così come l'utilizzo di soluzioni progettuali che siano durature e comportino il minimo numero di sostituzioni necessarie.

Stage	ADPE [kgSbe]				
	CEB	%	CHB	%	DIFF %
A1-2-3	3,870E-02	97,6%	4,08E-02	79,1%	-5,2%
A4	0,00E+00	0,0%	0,00E+00	0,0%	0,0%
A5	0,00E+00	0,0%	0,00E+00	0,0%	0,0%
B4	5,31E-04	1,3%	1,02E-02	19,9%	-94,8%
C1	0,00E+00	0,0%	0,00E+00	0,0%	0,0%
C2	0,00E+00	0,0%	0,00E+00	0,0%	0,0%
C3	3,92E-04	1,0%	4,71E-04	0,9%	-16,7%
C4	3,36E-05	0,1%	7,77E-05	0,2%	-56,7%
TOTAL	3,97E-02		5,16E-02		-23%

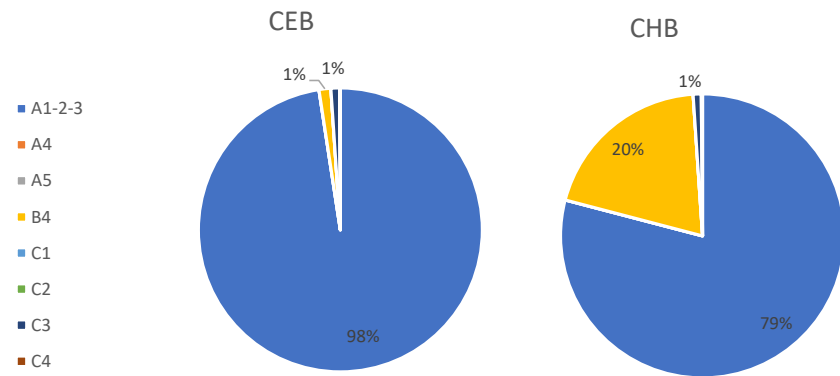
91.

A fianco: tabella rappresentante i risultati finali del Abiotic Depletion Potential of Elements (ADPE). Per ogni edificio, sono indicati i contributi delle singole fasi, illustrati nei capitoli precedenti e la loro incidenza percentuale sul risultato finale, accompagnati dalla differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici per ogni fase.

93.

A fianco: tabella rappresentante i risultati finali del Abiotic Depletion Potential of Fossil Fuels (ADPF). Per ogni edificio, sono indicati i contributi delle singole fasi, illustrati nei capitoli precedenti e la loro incidenza percentuale sul risultato finale, accompagnati dalla differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici per ogni fase.

Stage	ADPF [MJ]				
	CEB	%	CHB	%	DIFF %
A1-2-3	1,922E+05	69,6%	1,69E+05	45,3%	13,9%
A4	1,76E+03	0,6%	2,09E+03	0,6%	-15,5%
A5	2,60E+03	0,9%	2,17E+03	0,6%	19,6%
B4	6,72E+04	24,3%	1,84E+05	49,2%	-63,4%
C1	3,45E+02	0,1%	2,99E+02	0,1%	15,3%
C2	1,76E+02	0,1%	1,67E+02	0,0%	5,3%
C3	1,06E+04	3,8%	1,28E+04	3,4%	-17,7%
C4	1,24E+03	0,4%	2,90E+03	0,8%	-57,2%
TOTAL	2,76E+05		3,73E+05		-26%

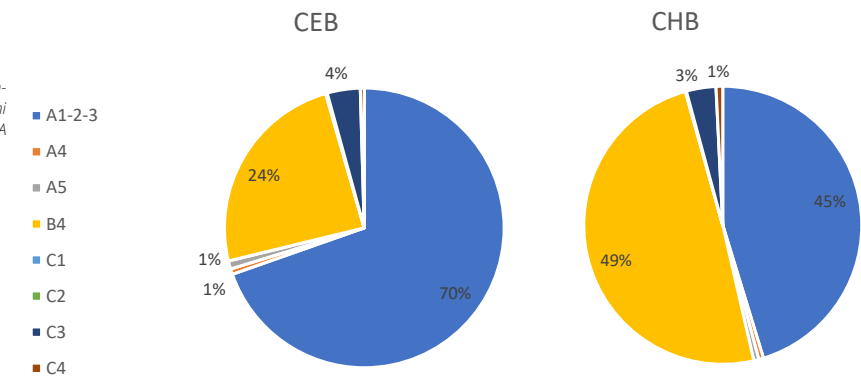


92.

A fianco: grafici a torta rappresentanti le incidenze percentuali di ogni fase considerata nello studio LCA sull'emissione totale finale.

94.

A fianco: grafici a torta rappresentanti le incidenze percentuali di ogni fase considerata nello studio LCA sull'emissione totale finale.



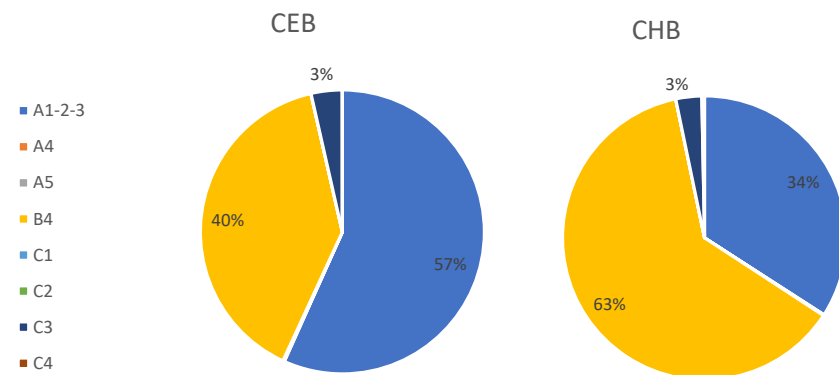
Il consumo di risorse che vanno a formare riserve che non hanno la capacità di rinnovarsi nel corso di un ciclo di vita risulta essere a favore dell'edificio in mattoni pressati in terra cruda. Come si è spiegato nei capitoli introduttivi di questo studio, questo risulta essere un indicatore che si è scelto di includere vista la necessità di salvaguardare un ecosistema, quello del fiume Niger, sul quale fa affidamento la grande maggioranza delle attività economiche maliane. L'agricoltura la pesca ed i trasporti, nonché le principali città ed attività del paese risultano dipendere dal fiume che, in uno stato occupato per più di metà dal deserto del Sahara, garantisce sostentamento a queste attività. L'estrazione incontrollata di sabbia garantisce lavoro e reddito ad una grandissima parte della popolazione e va a supportare la crescita del settore edilizio, per cui non si propone un arresto completo delle attività delle estrazione di sabbia dal fiume Niger, quanto più si vogliono fornire gli obiettivi e gli input per un cambiamento sociale che, supportato ed affiancato da una sostenibilità economica, potrebbe portare la terra cruda ad essere ritenuta un materiale da costruzione economicamente vantaggioso e socialmente accettabile.

Le fasi di trasporto vanno ad incidere sull'indicatore che misura il consumo di combustibili fossili. La scelta di utilizzare materiali locali incide sicuramente in modo positivo, così anche la minore necessità di sostituire elementi nel corso della vita utile dell'edificio, che in questo studio è stata ipotizzata della durata di 50 anni. Come nei casi precedenti, nonostante i maggiori quantitativi dei materiali utilizzati nell'edificio in terra, si ha uno scarto percentuale di circa il 25% a favore di quest'ultimo edificio.

Stage	NW [m3]				
	CEB	%	CHB	%	DIFF %
A1-2-3	3,949E+01	56,7%	3,67E+01	34,1%	7,6%
A4	4,97E-02	0,1%	5,88E-02	0,1%	-15,5%
A5	7,34E-02	0,1%	6,13E-02	0,1%	19,6%
B4	2,75E+01	39,5%	6,73E+01	62,5%	-59,1%
C1	9,73E-03	0,0%	8,44E-03	0,0%	15,3%
C2	4,96E-03	0,0%	4,71E-03	0,0%	5,3%
C3	2,46E+00	3,5%	3,17E+00	2,9%	-22,4%
C4	1,01E-02	0,0%	3,34E-01	0,3%	-97,0%
TOTAL	6,96E+01		1,08E+02		-35%

95.

A fianco: tabella rappresentante i risultati finali del Use of Net Fresh Water (NW). Per ogni edificio, sono indicati i contributi delle singole fasi, illustrati nei capitoli precedenti e la loro incidenza percentuale sul risultato finale, accompagnati dalla differenza percentuale fra le emissioni dei due edifici per ogni fase.



96.

A fianco: grafici a torta rappresentanti le incidenze percentuali di ogni fase considerata nello studio LCA sull'emissione totale finale.

Il consumo di acqua dolce risulta essere un indicatore importante, specialmente in una zona semidesertica. A livello di cantiere, la presenza di un pozzo nelle vicinanze della scuola apporta pone certamente rimedio a questa problematica, che resta comunque di primaria importanza a livello di sostenibilità ambientale. Le prestazioni dell'edificio in terra sono in generale migliori, essendo inferiori del 35% rispetto a quelle dell'edificio in cemento. Si nota anche qui l'importanza della fase di estrazione e produzione dei materiali in entrambi gli edifici analizzati, fase durante la quale l'indicatore dell'edificio in terra risulta essere superiore di circa l'8%. Andando a guardare nel dettaglio l'analisi di questa fase, si nota come questo contributo sia principalmente attribuibile all'utilizzo dell'acciaio. L'impatto delle travi IPE120 che sostengono le volte di copertura dell'edificio in terra trovano qui il loro principale contributo a livello di impatto, compensato nel resto del ciclo di vita dalle altre fasi. L'utilizzo di queste travi e dei mattoni che formano le volte, oltre a garantire una ventilazione degli ambienti interni, vanno a sostituire il controsoffitto utilizzato nell'edificio in cemento, elemento che necessita di diverse sostituzioni nel corso della fase di uso.

La maggiore sostenibilità ambientale dell'edificio bioclimatico, costruito utilizzando mattoni in terra cruda pressata, viene confermato dall'analisi LCA condotta comparando le emissioni ambientali generate, con quelle dovute ad un edificio in mattoni forati in cemento. Quest'ultimo si ipotizza sia caratterizzato da un design più semplice, che non prevede l'uso di soluzioni bioclimatiche come pareti ventilate e sistemi di raffrescamento passivo e che rispecchia la tipologia maggiormente diffusa negli ultimi decenni in Mali. Risultando scontata la maggiore sostenibilità legata all'utilizzo della terra cruda rispetto ad un uso dei mattoni forati in cemento per un edificio dalle caratteristiche uguali, non si era sicuri del risultato di un confronto come quello che è stato eseguito in questo studio. La scelta dei materiali e la loro produzione risulta avere un'importanza fondamentale a livello di sostenibilità ambientale e la sempre maggiore attenzione a questi aspetti, unita all'utilizzo di materiali locali, si crede che possa sia ridurre le emissioni dovute alle attività edilizie, sia creare una base di sviluppo sostenibile legato anche ad aspetti sociali ed economici. In un contesto come quello maliano, infatti, risulta particolarmente difficile porre la sostenibilità ambientale davanti ad aspetti sociali ed economici e si crede che un loro cambiamento sia attuabile attraverso il finanziamento ed il supporto di iniziative e di programmi che promuovano la diffusione delle conoscenze, delle tecniche e degli strumenti necessari per un rinnovato utilizzo della terra cruda, materiale che tutt'oggi caratterizza gran parte del patrimonio architettonico di questi luoghi.

La valutazione LCA che è stata condotta in questo studio e che ha quantificato e verificato la sostenibilità ambientale dell'edificio bioclimatico in terra cruda Kalan Deme So, può essere ulteriormente implementata dall'inclusione delle emissioni dovute alla fase di uso, esclusa per mancanza di dati e di conoscenze. Date le caratteristiche dell'edificio, si crede che questa fase possa aumentare ulteriormente il divario a livello di sostenibilità fra i due edifici e compensare i maggiori costi di costruzione attraverso un contenimento dei consumi durante la vita utile dell'edificio.

Si sottolinea, infine, come sia stato possibile adattare uno strumento come la Life Cycle Assessment ad un contesto al quale questo tipo di strumento non appartiene, o comunque dove non viene utilizzato e che risulta essere particolarmente distante dalle realtà per cui è stato creato. La valutazione LCA risulta, dunque, essere uno strumento valido ed adattabile a seconda delle diverse situazioni per la quantificazione e la verifica della sostenibilità ambientale degli edifici, purché sia condotta basandosi su dati sicuri ed ipotesi plausibili.

BIBLIOGRAFIA

- CRATerre, Houben, H., Guillaud, H. (2006). *Traité de construction en terre*, Editions Patenrhèses, Marseille
- Cellura, M. (2017). *Life Cycle Assessment dell'Edificio*. Editoriale Delfino, Milano
- Guardigli, L. (2018). *Edilizia e ambiente*. EdicomEdizioni, Monfalcone (Gorizia)
- I. Papayianni, E. Anastasiou & K. Papadopoulou (2015). *Comparative Life Cycle Assessment of earth-block and conventional concrete-based houses*. Laboratory of Building Materials, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), Greece.
- Gervasio, H. & Dimova, S. (2018). *Model for Life Cycle Assessment (LCA) of buildings*. Publications Office of the European Union
- Bertolini, M, Guardigli L (2020). *Upcycling shipping containers as building components: an environmental impact assessment*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*
- van Oers, L., Guinée, J.B. & Heijungs, R. (2019). *Abiotic resource depletion potentials (ADPs) for elements revisited*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*
- S Sala, L Benini, V Castellani, B Vidal-Legaz, R Pant (2016). *Environmental Footprint - Update of Life Cycle Impact Assessment methods*. Publications Office of the European Union
- Oliveira F, Hansson J, Gustavsson M (2015). *On environmental LCA for selected transport fuels*. Swedish Energy Agency and The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels

- EPD Average Aggregate – Holcim Romania
- EPD Adobe; 1200 kg/m³ - Okobaudat
- EPD Rammed earth wall; 2000 kg/m³ - Okobaudat
- EPD of Grey Cements– Holcim Romania
- EPD CEM IV 32.5 - Okobaudat
- EPD Profiled sheets made of steel for roof - IPPA EUROPE
- EPD Aluminium extrusion profiles - Okobaudat
- EPD Rigips plasters - Rigips Business Unit
- EPD Hand applied gypsum based plaster - Rigips Alci Sanay
- EPD Gyproc Loftplader – Saint Gobain
- EPD Scrap Steel - Colakoglu Metalurji
- EPD Scrap Steel - Emirates Steel

REFERENZE FOTOGRAFICHE

- 1 - Johann Dréo, 2006, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sviluppo_sostenibile.svg
- 3 - Rielaborazione da UNHCR Sahel Operation
- 4 - Rielaborazione da Atlas of Urban Expansion
- 5 - <https://oec.world/en/profile/country/mli>
- 7, 9, 23, 24, 25, 26, 27,28, 70, 72, 73, 97 - Michele Cattani, 2017-2020, per gentile concessione
- 14, 18, 19, 20 - Immagini e grafici elaborati dallo studio AGREBAT SARL
- Copertina pag. 18 - Michele Cattani, 2019, per gentile concessione
- 29, 30 43 e pag. 32 - Mattia Bertolini, per gentile concessione
- Pag. 40 - <https://www.circular-flooring.eu/news/what-is-a-life-cycle-assessment>
- 38 - <https://it.weatherspark.com/y/32134/Condizioni-meteorologiche-medie-a-Bamako-Mali-tutto-l'anno>
- Le restanti immagini e grafici, salvo quando indicato diversamente in didascalia sono ad opera del candidato, Pietro Pedrazzi.

RINGRAZIAMENTI

Ritengo questo elaborato e le esperienze qui raccolte una degna conclusione di un percorso durato ormai 10 anni e che ho più volte seriamente dubitato di riuscire a finire ma che, quasi incredulo, volge finalmente al termine.

Ringrazio di cuore chi non ha mai smesso di credere in me e nelle mie capacità: i miei genitori. Nonostante i miei tempi e le abissali differenze esistenti, non mi avete mai fatto mancare il vostro appoggio e, ciascuno a suo modo, mi avete accompagnato fino a qui.

Un ringraziamento ed un sorriso va anche alle mie due sorelle, Teresa e Marianna, con cui ho condiviso ogni istante di felicità ed ogni cocente delusione. Mi avete reso più facile ogni giorno che ho passato con voi. Ringrazio anche tutti gli altri parenti, nonne, zii, zie, cugine e cugini che non mi hanno mai fatto mancare una parola di supporto e conforto. Un grande pensiero ed un grande ringraziamento va agli amici di una vita: Pietro, Joe, Paolo, Alle e Tommy, che da sempre formano la base su cui posso sempre contare e su cui ho sempre contato e che hanno condiviso con me tante avventure. Quella universitaria è stata sicuramente la più lunga e difficile, ma alla fine anche qui ci scappa una festa.

Agli amici di una vita si sono aggiunti quelli di Bologna: grazie a Vieri, Fillo, Bado, Giulione, Simo, Gigio ed Ema che mi hanno ospitato innumerevoli volte, che mi hanno supportato e sopportato in ogni occasione e con cui ho condiviso momenti indimenticabili.

Un ringraziamento particolare va a Mattia, persona incredibile, compagno di studi migliore, professionista esemplare, correlatore fondamentale e soprattutto grandissimo amico. Sei per me una guida nello sconfinato campo della libertà e spero di poter continuare a collaborare insieme ad ogni progetto.

Grazie a tutti quelli che mi hanno passato appunti, tavole ed ogni sorta di materiale, in particolare Ilaria, che mi ha trascinato per gran parte di questi anni.

Ringrazio il professor Guardigli per avermi supportato nella stesura di questo elaborato, per avermi dato l'occasione di fare quello che più mi è piaciuto e per la disponibilità dimostrata nonostante i miei tempi.

Ringrazio Michele per le fotografie che arricchiscono questo mio elaborato e Cristina, George ed Elena per la mentalità con cui me l'hanno fatto affrontare.