



IL BIOCHAR PER L'ARCHITETTURA SOSTENIBILE

PRODUZIONE DI MALTA A BASE
CEMENTIZIA CON AGGIUNTA DI
MICRO/NANO PARTICELLE
DERIVANTI DA GASSIFICAZIONE
DI BIOMASSA

Politecnico di Torino
Dipartimento di Architettura e Design
Corso di Laurea Magistrale in
Architettura per il progetto sostenibile
a.a. 2017/2018



Tesi di Laurea Magistrale

Il Bio-char per l'architettura sostenibile
Produzione di malta a base cementizia con aggiunta di
micro/nano particelle derivanti da
gassificazione di biomassa

Relatore
Prof. Giuseppe Andrea Ferro
Correlatori
Dott.ssa Luciana Restuccia
Ing. Isabella Cosentino

Candidata
Yasmine Ravagli
238755

Settembre 2018

Ai miei genitori, presenti ad ogni traguardo raggiunto

Abstract

La necessità di sperimentare nuove tecnologie per la produzione di cemento nasce dall'incessante utilizzo del calcestruzzo come materiale da costruzione: esso infatti, come afferma il *World Business Council for Sustainable Development*, risulta essere la seconda materia utilizzata al mondo dopo l'acqua.

Nel 2016, inoltre, l'Italia si è classificata tra i primi quattro produttori di calcestruzzo in Europa¹ e tra i primi venti a livello globale, con una produzione di quasi 30 milioni di metri cubi . Tali numeri hanno come conseguenza elevati dispendi di energia durante la fase produttiva così come altrettante emissioni di CO₂ nell'atmosfera, causando un maggior inquinamento e contribuendo in modo fondamentale al riscaldamento globale. I dati riportati da *"Il Sole 24 ore"* ad Aprile 2018 informano che l'Italia ha presentato un aumento di emissioni di CO₂ di circa il 3,2%, rappresentando così più del 10% di emissioni relative a tutta l'Europa.

Stando, quindi, ai dati analizzati, è evidente come sia di primaria importanza intervenire alla radice di queste problematiche, focalizzando l'attenzione sulla riduzione delle materie prime e sul consumo di combustibili naturali.

In ragione di ciò, si è sempre più orientati a rispondere a questa

emergenza ambientale con *soluzioni sostenibili* in grado di soddisfare in modo efficiente le esigenze delle nuove tecnologie dell'architettura rispettando al contempo la natura.

Il presente lavoro si basa sull'utilizzo del bio-char, sottoprodotto di un processo di gassificazione dei materiali di scarto di origine vegetale, nei compositi a base cementizia. Il materiale, precedentemente caratterizzato dall'azienda NEOTRON Group-Analytical & Technical Services di Modena, è stato aggiunto in diverse percentuali rispetto al peso del cemento al fine di produrre campioni sperimentali di malta cementizia. L'attività, soprattutto di tipo sperimentale, oltre che di ricerca, ed è stata svolta all'interno del DISEG presso il quale sono state effettuate prove meccaniche dopo i 7 e i 28 giorni di maturazione.

L'uso di questo sottoprodotto ha garantito benefici da un punto di vista prestazionale, apportando miglioramenti in termini di resistenza, durezza e soprattutto duttilità.

Durante i test meccanici sono stati valutati parametri quali resistenza a flessione e a compressione ed energia di frattura.

Dai risultati ottenuti è evidente come la presenza di nano-micro particelle gassificate contribuisca, oltre che al miglioramento

delle proprietà meccaniche, alla riduzione della linearità della traiettoria di frattura rispetto a quella ottenuta con cemento tradizionale, con un conseguente aumento della superficie di frattura e quindi dell'energia di frattura: questo garantisce una maggiore prestazione del materiale.

È bene sottolineare come l'uso di bio-char sia di fondamentale importanza anche da un punto di vista ambientale poiché garantisce la riduzione di emissioni di CO₂ nell'atmosfera, rendendo così il materiale da costruzione più sostenibile. Inoltre, non è da sottovalutare la componente economica, poiché con questo processo si riducono i costi legati alla produzione primaria ma anche quelli legati allo smaltimento dei rifiuti in discarica, rispondendo ancora una volta in modo positivo al tema della sostenibilità ambientale.

Indice

1

abstract

9

introduzione

13

l'architettura sostenibile

*Il concetto di sviluppo sostenibile
La sostenibilità attraverso gli anni
La sostenibilità in architettura
I materiali, le tecniche e l'impatto ambientale*

105

l'attività sperimentale

*Introduzione
Materiali e metodi
Test di resistenza meccanica
Introduzione alla meccanica della frattura
Risultati*

187

life cycle assessment & life cycle cost

*Introduzione
LCA: criteri e valutazione
Analisi del ciclo di vita del bio-char
LCC: criteri e valutazione
Analisi dei costi del bio-char*

209

conclusioni & applicazioni in architettura

57

il cemento nelle costruzioni

Introduzione

*Ciclo produttivo e
classificazione del
cemento*

Uso e prestazioni

Impatto ambientale

Cemento alternativo

87

il biochar

Composizione e

produzione

Applicazioni

215

bibliografia & sitografia

223

allegati







Introduzione

Nel 2015 l'organizzazione delle Nazioni Unite (ONU) ha determinato i 17 obiettivi da raggiungere entro il 2030 con lo scopo di migliorare ed incrementare lo sviluppo sostenibile da un punto di vista economico, sociale ed ambientale; per quel che concerne quest'ultimo aspetto, quattro sono gli obiettivi principali: *"Città e comunità sostenibili"*, *"Consumo e produzione responsabile"*, *"Agire per il clima"* e *"La vita sulla terra"*.

In questo contesto si staglia con incredibile potenza l'architettura in tutti i suoi aspetti, inserendosi in un non indifferente **clima di cambiamento**.

Diversi sono i fenomeni a cui l'ONU cerca di porre un limite e nella nostra realtà uno dei più calzanti è senza dubbio l'aumento esponenziale dei rifiuti. Infatti, negli ultimi anni la produzione dei rifiuti ha raggiunto cifre piuttosto elevate: nel 2012 l'Unione Europea ne ha prodotti circa 2.515 milioni di tonnellate e il settore delle costruzioni è risultato essere quello con il contributo maggiore: **821 milioni di tonnellate**, circa il 33% sul totale¹ (a seguire le attività estrattive con il 29%, le attività manifatturiere con l'11%, le attività domestiche con l'8%, le attività legate alla produzione di energia con appena il 4% ed il restante 15% derivante da attività

natura).

Questa tipologia di rifiuti, detta "rifiuti da C&D", deriva direttamente dalle attività di costruzione e demolizione e, se trattate con un processo di recupero adeguato, è possibile dare loro una nuova vita, minimizzando così l'impatto sul territorio.

Le principali criticità connesse ad attività di questo tipo sono l'impoverimento delle materie prime e il rilascio di sostanze inquinanti nell'atmosfera; tali sostanze contribuiscono al cambiamento climatico che la nostra Terra sta subendo negli ultimi anni, con il rischio di ripercussioni irreversibili.

Il settore dell'edilizia incide circa del 15% sul totale delle emissioni di CO₂, senza contare quelle relative al restante ciclo di vita di un edificio (fase d'uso, manutenzione).

Questi dati forniscono un quadro piuttosto chiaro riguardo lo "stato di salute" della Terra, ed altrettanto chiara ne è la causa: **l'azione antropica**.

La necessità di fronteggiare ai bisogni dell'uomo ha inevitabilmente coinvolto il nostro pianeta, apportando aspetti positivi e negativi. Tuttavia, ad oggi sono possibili diverse soluzioni che consentono di affrontare le problematiche ambientali garantendo al contempo

il soddisfacimento dell'esigenze dell'architettura contemporanea e orientandosi sempre più verso un'*architettura sostenibile*.

Tra queste, senza dubbio, il riciclo dei rifiuti rappresenta uno dei temi chiave, soprattutto se relazionato alla produzione di materiali da costruzione, perché oltre a limitare l'uso delle risorse naturali, prevede un dispendio di energia minore, indirizzando il settore delle costruzioni verso una nuova frontiera di sviluppo sostenibile. Il **bio-char**, in quanto materiale derivante da rifiuti di varia natura, può rappresentare un importante punto di partenza.

¹ Fonte: Eurostat

1

L'architettura sostenibile

Il concetto di sviluppo sostenibile

La definizione di *sviluppo sostenibile* trae la sua origine dall'ecologia, secondo cui *"Lo sviluppo sostenibile è quello sviluppo che consente alla generazione presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri"*; tale sviluppo deve avvenire mediante l'uso di risorse naturali ad un ritmo tale da potersi rigenerare naturalmente.

Lo sviluppo sostenibile è caratterizzato da un approccio di tipo **olistico**, che coinvolge la *"totalità delle attività umane con il proposito di non compromettere la possibilità delle generazioni future di perdurare nello sviluppo, preservando la **qualità** e la **quantità** del patrimonio e delle riserve naturali."*

Pertanto, il tema della sostenibilità coinvolge le diverse tematiche che si affrontano durante tutte le fasi di vita di un manufatto edilizio (dalla progettazione alla dismissione): lo studio del territorio e dell'area di progetto, le caratteristiche strutturali, i materiali e l'energia necessaria al completamento dell'opera. Inoltre, la sostenibilità deve focalizzarsi anche sul comfort quotidiano dell'uomo, prestando attenzione al benessere psicofisico, al lavoro e alla mobilità. Durante la fase di progettazione è bene tenere conto di quelli che saranno i futuri processi di manutenzione,

di valutare la durata del manufatto, anche in vista di eventuali cambiamenti (rendendolo flessibile a livello funzionale e adattabile alle nuove tecnologie) e verificare l'idoneità relativa alle tecniche di montaggio e smontaggio. Infine, uno dei concetti chiave dello sviluppo sostenibile è, senza dubbio, la possibilità di trasformare e/o riciclare gli elementi costituenti il manufatto, valutando sempre l'opzione d'uso di energie derivanti da fonti rinnovabili.

Il concetto di sviluppo sostenibile emerge già dagli anni '50, quando, in seguito alla Seconda Guerra Mondiale, la società ha iniziato a svilupparsi sempre di più e le necessità dell'uomo sono aumentate; questa crescita continua ha comportato problemi legati a sovrappopolazione, inquinamento, aumento esponenziale di rifiuti ed impoverimento delle materie prime, causando una trasformazione quasi irreversibile dell'ambiente naturale.

Tuttavia, inizialmente questo tema si focalizza perlopiù sull'aspetto economico trovando le sue origini già nelle teorie del Capitalismo e del Socialismo: Ann-Mari Jansson (Dipartimento di Ecologia dei sistemi dell'Università di Stoccolma) afferma a riguardo: *"L'economia di mercato e l'economia a pianificazione centralizzata hanno ambedue fallito nel risolvere i problemi ambientali. Anche*

*se le conseguenze del fallimento sono state più gravi all'Est, è difficile capire le dichiarazioni di fede per cui il libero mercato risolverebbe in modo automatico tutti i problemi, proprio perché sono evidenti la **distruzione delle risorse naturali** e la **produzione di sostanze tossiche** che la moderna società industriale ha determinato. La diversità degli ecosistemi e delle culture umane può essere gestita in maniera "sostenibile" solo considerando le capacità e i limiti dell'ambiente nei confronti delle attività economiche. È un problema di interdipendenze."*

Con questo messaggio Ann-Mari Jansson pone luce sul fatto che teorie di sviluppo sostenibile legate esclusivamente all'ambito economico hanno aggravato la situazione ambientale, ma anche quella sociale. La spinta, l'avanzare rapidamente verso un progresso di tipo economico ha portato ad un regresso di tipo ecologico: *"Il tempo tecnologico è inversamente proporzionale al tempo biologico; il tempo economico è inversamente proporzionale al tempo entropico."*²

Di fronte a tali evidenze è stato necessario un intervento che ricalibrasse l'attività antropica in relazione alle risorse della Terra, riportando la realtà a quanto già affermava Rudolf Clausius³ nel

1885: *"Nell'economia di una nazione c'è una legge di validità generale: non bisogna consumare in ciascun periodo più di quanto è stato prodotto nello stesso periodo. Perciò dovremmo consumare tanto combustibile quanto è possibile riprodurne attraverso la crescita degli alberi."*

Pertanto, a partire dagli '70 lo sviluppo sostenibile ha modificato il suo approccio orientandosi verso un modello in grado di conciliare la crescita economica con un uso bilanciato delle risorse naturali. Nel 1972 fu fondato il primo Partito verde della storia, lo *"United Tasmania Group"* (U.T.G.) in Tasmania (Australia); l'anno successivo nacque il *"Green party"* in Gran Bretagna, mentre in Italia nel 1985 nacque quella che poi diventerà la *"Federazione dei Verdi"*. Tuttavia, già nel 1972 Aurelio Peccei⁴, fondatore del Club di Roma⁵, pubblicò *"Il rapporto sui limiti dello sviluppo"* (dal libro *"The Limits to Growth"*), in cui si predicavano le conseguenze ambientali che avrebbe causato la continua crescita, sottolineando che le risorse naturali non erano infinite e che la Terra avrebbe raggiunto alti livelli di inquinamento. Con questo rapporto l'imprenditore italiano attirò l'attenzione del pubblico, ponendo la questione ambientale sotto una nuova luce.

“Nel frattempo, si è verificato un progresso spettacolare nella ricerca scientifica; le enormi spese sostenute in questo senso in tutti i paesi industrializzati forniscono un ricco e fiorente deposito di sapere onde sta certamente sorgendo un ancor più ampio sviluppo tecnologico con conseguenze, per il futuro della società, importanti ma indistintamente percepite. Dobbiamo riconoscere l'enorme successo della scienza e della tecnologia nel provocare un'ondata di prosperità e sviluppo economico, a un livello senza precedenti sul nostro pianeta, che ha aumentato e arricchito i nostri rifornimenti alimentari, allungato le nostre vite e portato salute e agi a milioni di persone. Alle passate generazioni questa sarebbe apparsa come l'età d'oro.

Ma la scienza e la tecnologia, con tutti i loro meriti, sono state anche le principali cause della complessità della situazione moderna, dello straordinario aumento della popolazione di cui stiamo soffrendo, dell'inquinamento e degli altri spiacevoli effetti dell'industrializzazione. Non desideriamo certo tornare alla situazione di qualche secolo addietro, quando l'incremento della popolazione era controllato dalla fame e dalle malattie, ma non abbiamo ancora imparato a controllare il presente. E, mancando

una chiara visione di come vogliamo il futuro, non sappiamo verso quale precisa direzione guidare l'enorme forza rappresentata dalla ricerca scientifica e tecnologica, una forza potenzialmente capace di dare sia progresso sia distruzione.⁷¹

Da quel momento la concezione di sviluppo sostenibile ha preso coscienza della sua efficacia solo in presenza delle tre dimensioni della sostenibilità: **economica, ambientale e sociale** (Fig.1.1).



Fig.1.1 Lo sviluppo sostenibile

Il 4 agosto del 1987 la *Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo* (WCED) ha redatto un documento chiamato "**Rapporto Brundtland**", anche conosciuto come "*Our Common Future*", in cui per la prima volta viene introdotto il concetto di sviluppo sostenibile in via ufficiale. Con questo documento vengono messe in evidenza le criticità che intercorrono tra le due grandi tematiche: ambiente e sviluppo, ponendo attenzione anche alla relazione tra la tutela ambientale e lo sviluppo economico. Allo stesso modo la Commissione suggerisce delle soluzioni attuabili sia dai Governi che dalle Organizzazioni internazionali. Nel rapporto Brundtland viene esplicitato lo "stato di salute" del pianeta e viene proposto un nuovo modello di crescita improntato sulla sostenibilità.

"Il concetto dello "sviluppo sostenibile" si basa sull'idea secondo cui bisogna dar vita ad una forma di sviluppo presente che non intacchi però l'ambiente al punto da compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze di godimento delle risorse naturali⁸." Di conseguenza, anche gli Stati hanno dovuto approcciarsi alle politiche economiche in modo differente, garantendo un uso sostenibile delle risorse naturali, cercando quanto più possibile di non esaurire le fonti

non rinnovabili in tempi ristretti e badando, allo stesso tempo, alla capacità di rigenerazione delle fonti rinnovabili.

Risultato di questo processo è un concetto di sviluppo sostenibile basato principalmente su:

- ecologia;
- equità sociale;
- economia

elementi che devono necessariamente essere in equilibrio tra loro.

Nelle politiche attuative degli Stati la sostenibilità fa riferimento a:

- l'uso della biosfera da parte delle generazioni attuali capace di mantenere il potenziale a beneficio delle future generazioni;
- modelli di sviluppo economico in grado di evitare l'impoverimento delle risorse naturali e il degrado di quelle ambientali.

“La sostenibilità è difficilmente classificabile come forza globalizzante, perché cade esattamente tra frammentazione e integrazione. Le questioni ambientali sono integrative, nel senso che il valore di preservare l'ambiente e mantenere la sua vitalità è largamente condiviso a ogni livello comunitario, ma le stesse questioni hanno portato ad una frammentazione diffusa e a una divisione tra e all'interno dei gruppi, delle comunità, dei Paesi e

dei Sistemi Internazionali essendo le azioni intraprese per attuare gli impegni sull'ambiente altamente controverse e in gran parte inefficaci."

(Rosenau, J^o., "Globalization and governance: bleak prospects for sustainability. *Internationale Politik und Gesellschaft*", 2003)

Alla fine degli anni '80 Karl-Henrik Robert¹⁰, un oncologo svedese, coinvolse diversi scienziati con l'obiettivo di dare una definizione sistemica e condivisa di sostenibilità, in modo tale da concretizzare i principi teorici dello sviluppo sostenibile e porre le basi per processi partecipativi efficaci. Con questa premessa elaborò "The Natural Step Framework", un documento di sviluppo sostenibile strategico che fornisce una definizione chiara e semplice di **sostenibilità**. Grazie a questo documento è stato possibile avere un linguaggio condiviso e consentire alla collettività di lavorare per rispondere in modo efficace al cambiamento imminente.

Nel 1991 l'economista ambientale Herman Daly¹¹ introdusse il principio di equilibrio tra uomo ed ecosistema secondo cui:

- il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione;
- l'immissione di sostanza inquinanti e di scorie nell'ambiente non

deve superare la capacità di carico dell'ambiente stesso;
- lo stock di risorse non rinnovabili deve restare costante nel tempo.

Dieci anni dopo, nel 2001, l'UNESCO interviene ampliando l'originario concetto di sviluppo sostenibile (basato sull'equilibrio tra ecologia, equità sociale ed economia) con l'aggiunta di un quarto pilastro: la **diversità culturale** (Fig.1.2).

"La diversità culturale è necessaria per l'umanità quanto la biodiversità per la natura (...), la diversità culturale è una delle radici dello sviluppo inteso non solo come crescita economica, ma anche come mezzo per condurre una esistenza più soddisfacente sul piano intellettuale, emozionale, morale e spirituale¹²."



Fig.1.2 Lo sviluppo sostenibile

La sostenibilità attraverso gli anni

Il tema della sostenibilità divenne uno dei temi più trattati a livello internazionale, tanto che gli furono dedicate una serie di conferenze di notevole importanza.

Nel **1972** l'Organizzazione delle Nazioni Unite (O.N.U.) organizzò la **Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente umano** (UNCHE, United Nations Conference on Human Environment) a Stoccolma; in questa occasione vennero trattati per la prima volta gli argomenti della protezione ambientale e dello sviluppo umano, definendone i principi fondamentali che i vari Governi avrebbero dovuto rispettare in vista di un corretto sviluppo sostenibile (Dichiarazione di Stoccolma). Dalla conferenza nacque l'UNEP (United Nations Environmental Programme), il programma avanzato dall'O.N.U. in cui furono definite le principali criticità legate all'ambiente e gli obiettivi da raggiungere dalle politiche organizzative coordinate dall'O.N.U.

Nel **1983** fu istituita la "**World Commission on Environment and Development**", una commissione, composta da 22 membri provenienti da 21 paesi diversi, che aveva il compito di redigere un'agenda globale per il cambiamento; l'obiettivo di questa istituzione era quello di favorire la collaborazione tra i vari Stati in

vista di maggiore consapevolezza e impegno per la salvaguardia ambientale. Fu proprio la World Commission on Environment and Development a pubblicare, in occasione della **Conferenza di Tokyo** nel **1987**, il Rapporto Brundtland (dal nome del presidente norvegese Gro Harlem Brundtland¹³ della Commissione istituita nel 1983) intitolato "Our Common Future", di cui si è già parlato, in cui viene definito il concetto di sviluppo sostenibile, secondo cui *il futuro dipende da uno sviluppo economico compatibile con l'equità sociale e gli ecosistemi, preservando la qualità e la quantità del patrimonio e delle riserve naturali e operando in regime di equilibrio ambientale.*

Lo sviluppo sostenibile sponsorizzato dal Rapporto Brundtland prevede la tutela della comunità in generale per quel che riguarda il lavoro e le relative condizioni, un uso più intelligente delle risorse tramite dei modelli economici più efficienti e una maggiore attenzione alla tutela dell'ambiente attraverso una maggiore sensibilizzazione della collettività a comportamenti più responsabili.

Nello stesso anno furono banditi i CFC (Cloro Fluoro Carburi); questi gas sono stati ritenuti dannosi per l'ozono stratosferico.

Nel **1992** si tenne a Rio de Janeiro la **Conferenza Summit della Terra di Rio** o anche chiamata **United Nations Conference on Environment and Development** (UNCED) a cui parteciparono 178 governi, 108 capi di Stato o di Governo e 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative. L'obiettivo della conferenza era quello di stabilire un punto di incontro tra le necessità primarie dei Paesi sottosviluppati e quelle dei Paesi già industrializzati. Il risultato fu la redazione di una serie di documenti:

- la *Dichiarazione di Rio sull'ambiente e sullo sviluppo*, in cui vengono definiti i 27 principi su cui è basata la relazione tra ambiente e sviluppo;
- l'*Agenda 21*, in cui vengono *pianificate le azioni da intraprendere a livello mondiale, nazionale e locale dalle organizzazioni delle Nazioni Unite, dai governi e dalle amministrazioni in cui la presenza umana ha impatti sull'ambiente*. Si tratta di un documento composto da quaranta capitoli in cui vengono indicate le azioni da fare nel XXI secolo in vista di uno sviluppo sostenibile. Si tratta di un manuale d'azione che guida la comunità nelle diverse attività quotidiane.
- la *Convenzione sulla diversità biologica*, che ha lo scopo

di tutelare la biodiversità e le sue componenti e di fare un uso efficiente dei benefici apportati da quest'ultime (giuridicamente vincolante);

- i *Principi sulle foreste*, in cui vengono definite le azioni per la salvaguardia delle foreste mediante uno sfruttamento sostenibile;
- *Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici*, che ha l'obiettivo di ridurre le emissioni dei gas serra e precede quello che sarà il Protocollo di Kyoto.

Nel **1994** si tenne ad Aalborg, in Danimarca, la prima **Conferenza Europea sulle Città Sostenibili**, nota anche come **Conferenza di Aalborg**, organizzata da ICLEI (International Council for Local Environmental Initiatives) sotto il patrocinio congiunto della Commissione Europea e della stessa città. A fine della conferenza fu redatta la **Carta di Aalborg** approvata e firmata dai partecipanti (80 amministrazioni locali europee, 253 rappresentanti di organizzazioni internazionali, governi nazionali, istituti scientifici, consulenti e singoli cittadini). Con questo documento fu dato il via alla "Campagna Europea delle Città Sostenibili" in cui gli Stati europei si impegnano nell'attuazione dell'Agenda 21 a livello locale e all'elaborazione di programmi di sviluppo sostenibile duraturi

nel tempo accompagnati da campagne di sensibilizzazione della comunità.

La Carta di Aalborg è costituita da tre parti:

- Dichiarazione di principio: Le Città europee per un modello urbano e sostenibile;
- La Campagna delle Città Europee Sostenibili;
- L'impegno nel processo d'attuazione dell'Agenda 21 a livello locale: i piani locali d'azione per un modello urbano sostenibile.

Tre anni dopo, nel **1997**, in Giappone, fu organizzata Terza Conferenza COP3 della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, conosciuta anche come **Conferenza di Kyoto**. Il documento simbolo di questa conferenza è il famoso "Protocollo di Kyoto", un trattato internazionale, sottoscritto da più di 160 Paesi, che definisce gli obiettivi relativi ai tagli sulle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento globale. Così i paesi industrializzati si impegnarono fare in modo che le emissioni globali di inquinanti si riducessero di almeno il 5,2% nel periodo 2008-2012 rispetto al livello di emissioni registrata nel 1990. Affinché il trattato entrasse in vigore era necessaria l'approvazione da parte di almeno 55 nazioni (tra cui 34 Paesi

industrializzati con una percentuale che rappresenta almeno il 55% delle emissioni di anidride carbonica) ed entrò ufficialmente in vigore il 16 febbraio del 2005 con l'adesione della Russia. Tra le 118 nazioni che si impegnarono in questa missione erano assenti gli Stati Uniti, che al contrario si classificarono tra i primi produttori di gas inquinanti al mondo, in quanto una riduzione di questo genere avrebbe, senza dubbio, provocato una riduzione di guadagno economico.

Nel **2001** fu elaborata la **Convenzione di Stoccolma**, che aveva l'obiettivo di ridurre l'uso di POP (inquinanti organici persistenti): queste sostanze sono altamente nocive per l'ambiente e sono costituite da composti chimici organici capaci di diffondersi in aria, acqua e terreno e resistenti al degrado ambientale; non si trasformano e persistono nell'ambiente, accumulandosi nei tessuti biologici animali e umani. La convenzione, a cui aderirono 181 Paesi, entrò ufficialmente in vigore il 17 maggio del 2004.

Nel **2002** si tenne il **Vertice Mondiale sullo Sviluppo Sostenibile (World Summit on Sustainable Development)** a Johannesburg, in Sud Africa, a cui parteciparono 189 sui 195 degli Stati membri dell'O.N.U. e diverse Organizzazioni Non Governative (O.N.G.).

In questa occasione si fece conto di quanto ottenuto fino a quel momento, osservando che la situazione ambientale era tutt'altro che migliorata. Si definirono, pertanto, le manovre d'azione per raggiungere gli obiettivi prefissati già durante il Summit di Rio del 1992 e procedere verso uno sviluppo sostenibile concreto e adeguato:

- *L'adozione di un piano d'azione, sottoscritto da tutti gli Stati presenti, in cui sono stati individuati i temi chiave del decennio successivo;*

- *Sono state presentate delle iniziative volontarie di collaborazione tra governi, istituzioni, imprese e società civile per dare concretezza al piano;*

- *È stato rinnovato l'impegno dei leader mondiali a favore della lotta alla povertà attraverso uno sviluppo economico svincolato dal degrado ambientale e dal consumo esasperato di risorse¹⁴.*

Nel **2006** il Consiglio Europeo adottò l'**Agenda di Göteborg**, una strategia volta allo sviluppo sostenibile mediante la stretta e rinforzata collaborazione tra i vari membri dell'Unione Europea. Questa nuova strategia prevedeva un intervento per rispondere in modo positive a sette principali sfide:

- cambiamenti climatici ed energia pulita;
- trasporti sostenibili;
- consumo e produzione sostenibili;
- conservazione e gestione delle risorse naturali;
- salute pubblica;
- inclusione sociale, demografia e migrazione;
- povertà mondiale e sfide dello sviluppo.

L'obiettivo principale era il soddisfacimento dei requisiti stabiliti dal protocollo di Kyoto attraverso due direzioni principali:

- il risparmio energetico ottenuto con l'ottimizzazione nelle fasi produttive mediante l'uso di sistemi ad alta efficienza e maggiore consapevolezza del consumo;
- lo sviluppo di fonti di energia alternative e la riduzione del consumo di combustibili fossili.

Durante la **15° Conferenza delle Nazioni Unite sui Cambiamenti climatici (COP15)**, tenutasi nel **2009** a Copenhagen, furono discussi diversi punti per incentivare lo sviluppo sostenibile. Innanzitutto, la Commissione cercò di prevedere le future strategie da adottare entro il 2013, anno di scadenza del protocollo di Kyoto, riconsiderò la posizione degli Stati Uniti, che in quel momento si mostrarono

favorevoli a prendere parte alle trattative, grazie al nuovo presidente Barack Obama, e fissò un budget economico atto a finanziare gli interventi necessari all'efficientamento energetico e alla riduzione dell'inquinamento. Come risultati della Conferenza si ottennero il mantenimento del surriscaldamento globale di 2 gradi celsius al di sopra dei limiti preindustriali, l'impegno da parte dei Paesi ricchi ad aiutare i Paesi poveri con finanziamenti di 30 miliardi all'anno (e di 100 miliardi dopo il 2020) e l'impegno a ridurre l'attività di deforestazione.

Tuttavia, i provvedimenti necessari per il post Protocollo di Kyoto non furono definiti in quell'occasione ma rimandati alla COP16.

Infatti, nel **2010** fu indetta la 16° Conferenza della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti climatici, anche nota come **Vertice di Cancun**, durante la quale i governi firmatari del Protocollo di Kyoto concordarono sull'esigenza di ridurre le emissioni di gas serra dal 20% al 40% entro l'anno 2020 (sempre rispetto ai dati registrati nell'anno 1990). Il piano dei tagli sulle emissioni riguardò esclusivamente i firmatari del Protocollo di Kyoto, con l'esclusione di Stati Uniti, Cina e India i quali, pur avendo aderito nel 1990, avrebbero potuto agire in regime di

deroga. In questa occasione fu confermata l'istituzione di un budget di finanziamento per paesi in via di sviluppo e fu istituito un Fondo per il Clima, il **Green Climate Fund**, da cui erogare finanziamenti di 10 miliardi di dollari annui (100 miliardi annui entro il 2020) per il trasferimento di tecnologie pulite e per fermare l'attività di deforestazione. In relazione a quest'ultima problematica, fu introdotto il meccanismo REDD+ (Reduction of Emissions from Deforestation and Forest Degradation) che migliora la cooperazione internazionale per quel che concerne il settore forestale.

In occasione della 17° Conferenza della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti climatici (COP17) del **2011**, **Vertice di Durban**, si stabilì che entro il 2015 un gruppo di lavoro speciale avrebbe redatto un accordo per coinvolgere tutti i Paesi del mondo che sarà attuato entro il 2020. Fu inoltre prolungata la scadenza del Protocollo di Kyoto al 2017 senza, tuttavia, l'adesione di Stati Uniti ma con quella di Cina e India, senza però impegnarsi nella riduzione delle emissioni e con il ritiro di Russia, Giappone e Canada.

Nel **2012** a Doha ci fu la **18ª Conferenza delle Nazioni Unite**

sui cambiamenti climatici (COP18) in cui l'obiettivo principale era quello di impegnarsi in attività sempre più vincolanti. La "Climate change talks" di Bangkok avrebbe dovuto rappresentare un'importante occasione per la definizione delle tematiche e degli obiettivi da discutere durante la COP18, ma i vari gruppi di Paesi restarono fermi sulle loro scelte riguardo al prolungamento del Protocollo di Kyoto ma anche circa l'attuazione della piattaforma di Durban approvata l'anno precedente.

Nello stesso anno a Rio de Janeiro si è tenuta la conferenza mondiale conosciuta come "**Conferenza delle Nazioni Unite sullo Sviluppo Sostenibile**" (UNCSD), anche nota come "**Conferenza Rio 20+**". Gli obiettivi principali erano rinnovare l'impegno della politica nel tema della sostenibilità, verificare l'effettiva attuazione degli accordi internazionali nel ventennio precedente e incrementare il coinvolgimento dei governi e della comunità verso obiettivi e sfide comuni da affrontare in futuro. La conferenza si è conclusa con l'elaborazione di un documento di natura programmatica dal nome "*The Future We Want*" con cui vengono avviati numerosi processi internazionali e nazionali su temi critici per la salvaguardia del Pianeta. Tra questi, il processo di definizione di nuovi *Obiettivi*

globali per lo sviluppo sostenibile e la creazione di un *Foto Politico di Alto livello sullo Sviluppo Sostenibile* sono tra i più rilevanti.

La Conferenza si è concentrata su due temi principali¹⁵:

- **"A Green Economy in the context of sustainable development and poverty eradication"** (**Un'economia verde nel contesto dello sviluppo sostenibile e riduzione della povertà**): da intendersi come transizione verso un'economia verde (adattata al contesto nazionale), che non sia solo un miglioramento ambientale, ma un nuovo paradigma che cerchi di alleviare minacce globali come il cambiamento climatico, la perdita di biodiversità, la desertificazione, l'esaurimento delle risorse naturali e al tempo stesso promuovere un benessere sociale ed economico;

- **"Institutional framework for sustainable development"** (**Quadro istituzionale per lo sviluppo sostenibile**): da intendersi come riferimento al sistema di governance globale per lo sviluppo sostenibile, includendo le istituzioni incaricate di sviluppare, monitorare e attuare le politiche di sviluppo sostenibile attraverso i suoi tre pilastri: sociale, ambientale ed economico. A seguito della decisione n° 1 del 26° Governing Council dell'UNEP (Nairobi, 21-24 Febbraio 2011) il tema del quadro istituzionale per lo sviluppo

sostenibile include anche il processo di riforma della Governance Internazionale dell'ambiente (IEG).

Il 25 settembre del **2015** le Nazioni Unite hanno approvato l'**Agenda Globale per lo sviluppo sostenibile e i relativi 17 Obiettivi di sviluppo sostenibile (Sustainable Development Goals - SDGs** nell'acronimo inglese), articolati in 169 Target da raggiungere entro il 2030¹⁶. In questa occasione è stata mostrata l'inefficienza dell'attuale modello di sviluppo sostenibile e si assisteva ad un'ulteriore sollecitazione dei Paesi per un maggiore impegno. L'impegno richiesto consiste nella definizione di un proprio programma d'azione che permetta ad ogni Paese di raggiungere i 17 Obiettivi, percorso che viene poi valutato periodicamente dall'ONU mediante l'attività dell'High Level Political Forum (HLPF) e le opinioni pubbliche nazionali ed internazionali.

"The new agenda is a promise by leaders to all people everywhere. It is an agenda for people, to end poverty in all its forms - an agenda for the planet, our common home"

(**Ban Ki-moon**, Segretario Generale delle Nazioni Unite)

Infine, nel dicembre del **2015**, in occasione della **21° Conferenza delle Parti della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui**

Cambiamenti climatici (COP21), tenutasi a Parigi, è stato negoziato l'**Accordo di Parigi**. Questo consiste in un accordo universale e giuridicamente vincolante sulla riduzione dei cambiamenti climatici che fu accettato da tutti i rappresentanti delle 195 parti che hanno partecipato alla conferenza ed è entrato in vigore solo con la ratificazione di almeno 55 paesi e con una copertura delle emissioni globali pari almeno il 55%. L'accordo raggiunto impegnava a mantenere l'innalzamento della temperatura sotto i 2° e, se possibile, sotto 1,5° rispetto ai livelli preindustriali.

La sostenibilità in architettura

I dati degli ultimi decenni hanno mostrato quanto sia significativo l'impatto del settore dell'edilizia sull'ambiente: esso è responsabile del 40% del consumo energetico mondiale, di 1/3 delle emissioni di gas inquinanti in atmosfera e del 40% della produzione di rifiuti. Si tratta di cifre non indifferenti che hanno portato i vari Stati a responsabilizzarsi maggiormente e a modificare parte dell'iter edile nell'ottica di costruzioni "verdi", vale a dire la realizzazione di edifici rispettosi dell'ambiente in termini di gestione delle risorse, di limitazioni dell'inquinamento e di garanzia di salubrità all'interno dell'ambiente per salvaguardare la salute dell'uomo.

Ed è per questo che negli ultimi anni l'edilizia sostenibile è in forte sviluppo tanto che la **Direttiva Europa 2010/31/UE** prevede che **entro il 31 dicembre 2020** tutti gli edifici di **nuova costruzione** siano edifici a **energia quasi zero**, mentre entro il **31 dicembre 2018** gli edifici di **nuova costruzione occupati da enti pubblici** e di proprietà di questi ultimi siano edifici a **energia quasi zero**.

L'**architettura sostenibile** è quindi diventata una necessità.

Ma cosa si intende realmente per architettura sostenibile? Nel gergo spesso le definizioni di architettura bioclimatica, bioedilizia, architettura ecologica ed edilizia sostenibile vengono usati come

sinonimi anche se hanno significati differenti.

Quando si parla di **architettura bioclimatica** si intende un tipo di costruzione in linea con le caratteristiche climatiche del luogo in cui è ubicato; l'edificio viene realizzato con l'uso di risorse energetiche rinnovabili e fa uso degli elementi naturali del sito, elementi che consentono il soddisfacimento dei requisiti di comfort termico senza l'aggiunta di impianti di climatizzazione. L'architettura bioclimatica è una conseguenza della crisi energetica degli anni '70 e prevede lo studio di soluzioni tipologiche e sistemi tecnologici, perlopiù di tipo passivo, in grado di rispondere alle esigenze ambientali e ottimizzare gli scambi termici tra interno ed esterno. Gli edifici che rientrano sotto tale definizione sfruttano al massimo l'energia di sole, vento e acqua come strumento per l'autosufficienza.

La **bioedilizia**, invece, deriva dalla traduzione di "**bau biologie**" utilizzato dall'Istituto Indipendente di Ricerca di Neubern (Germania) per indicare un tipo di "costruito biologico". La novità qui sta nell'aver focalizzato l'attenzione sull'utente, e non più su ciò che viene costruito, con l'obiettivo di soddisfare il **benessere fisico**, ma anche **psichico**, dell'uomo. Durante la progettazione

si presta estrema attenzione alla forma e alla disposizione degli ambienti, alla luce, alla scelta di materiali e colori che tutelino l'equilibrio di chi lo abita. Anche la bioedilizia prevede la riduzione dell'uso di energie non rinnovabili e, soprattutto, favorisce l'uso di materiali e processi costruttivi eco compatibili in modo da attenuare gli effetti che gli edifici hanno sulla salute umana (ad esempio gli effetti dell'amianto) e sull'ecosistema circostante. Le principali criticità a cui si può venire incontro sono¹⁸:

- **Umidità**: in caso di infiltrazioni d'acqua proveniente direttamente dal terreno su cui sorge l'edificio o effetto di materiali da costruzione solo parzialmente asciutti;
- **Sismicità**: se l'edificio è situato in un'area sismica precedentemente o successivamente alla sua costruzione;
- **Infiltrazioni di Radon**: nel caso in cui questo pericoloso gas riesca a filtrare dal terreno alla base dell'edificio e si diffonda, poi, a causa dei materiali impiegati nella costruzione;
- **Scariche elettrostatiche**: quando la struttura abitativa rifletta le onde elettromagnetiche generate dagli elettrodomestici. Ciò è dovuto all'assenza nei materiali applicati di uno specifico trattamento per neutralizzare i flussi in questione;

- **Inquinamento acustico e climatico:** nel caso in cui i serramenti e le pareti dell'abitazione non garantiscano sufficiente protezione dai rumori e dalle temperature esterni;
- **Presenza di Formaldeide:** gas irritante dall'odore penetrante usato nelle tappezzerie, negli isolanti, nei truciolati, nelle moquette, nei tessuti.

La meticolosa attenzione posta nei confronti di questa tematica ha come risultato un'ampia serie di manuali in cui vengono descritti i materiali e le tecnologie più biocompatibili.

Infine, l'architettura ecologica deve la sua definizione all'espressione di origine anglosassone usata per intendere un'architettura "ambientalmente responsabile" (eco = oikos = ambiente). In seguito alla **Conferenza Summit della Terra di Rio**, tenutasi nel 1992, tuttavia tale espressione viene sostituita con la più generica "attività costruttiva sostenibile", in quanto caratterizzata da tematiche di tipo socio-economico. In particolare, un'attività costruttiva sostenibile elabora un progetto tenendo in considerazione l'inquinamento dell'aria interna, il ciclo di vita di materiali e componenti impiegati nella costruzione e il comportamento energetico correlato anche alle soluzioni tecnologiche adoperate.

Inoltre, affinché l'edificio sia del tutto sostenibile, vengono valutati anche gli aspetti economici ed ambientali, per verificare l'impatto edilizio sia in termini di costo che di emissione di inquinanti. Per migliorarne la sostenibilità, l'edificio può far uso di elementi derivanti da riciclaggio, o prevede esso stesso parti riutilizzabili e/o riciclabili, sempre tenendo in considerazione la salvaguardia dell'ambiente e della salute umana.

Queste definizioni sono tutte relative alla costruzione di un *edificio sostenibile* ovvero *un sistema in grado di mantenere costanti le proprie prestazioni nel tempo con un ridotto consumo energetico e di materiali*, pertanto quando si parla di *Architettura o Edilizia Sostenibile* è bene tenere a mente tutte le caratteristiche descritte. *“Ormai da diverso tempo l'idea della sostenibilità si aggira nei meandri del dibattito architettonico. Ci sarebbe da esser felici se, silenziosamente, tutti avessero veramente capito la reale portata del concetto. Chiunque, oggi, esige progetti sostenibili. Non si fa più nemmeno un concorso per l'ampliamento di un asilo, senza che ci sia una richiesta in tal senso. Quello che è più spiacevole sottolineare è che quest'interesse per l'ecologia e l'ambiente scompare con il progetto stesso, nel senso che perde significato*

non appena l'oggetto è veramente costruito. [...]

La sostenibilità riguarda la scelta e l'origine dei materiali, l'energia consumata per il trasporto e la trasformazione, il processo costruttivo degli edifici, la qualità delle loro performances termiche, l'energia necessaria al buon funzionamento, i processi della manutenzione, la complessiva durata degli insiemi, la flessibilità funzionale interna, l'adattabilità alle nuove tecnologie (di approvvigionamento, smaltimento e comunicazione), l'idoneità alle tecniche di smontaggio e rimontaggio, le possibilità di trasformazione e di riciclaggio e naturalmente anche, e in modo specifico, la possibilità di utilizzo di energie pulite, soprattutto quella solare, per riscaldare, raffrescare, ventilare, illuminare naturalmente e accumulare energia elettrica. L'elenco è certamente incompleto..."

(Arch. Thomas Herzog - Editoriale Costruire in Laterizio n. 89)

In sintesi, la sostenibilità di un edificio coinvolge aspetti legati: all'ambiente, all'efficienza energetica, al consumo di acqua, alla qualità della vita degli occupanti, alla durabilità, al rapporto tra costi e benefici e ai materiali da costruzione (Fig.1.3) e può essere delineata tramite **10 principi guida**, definiti con l'obiettivo di

scelte normative regionali o locali e di indirizzare gli enti verso una programmazione delle politiche concernenti l'edilizia:

- Ricercare uno sviluppo armonioso e sostenibile del territorio, dell'ambiente urbano e dell'intervento edilizio;*
- Tutelare l'identità storica delle città e favorire il mantenimento dei caratteri storici e tipologici legati alla tradizione degli edifici;*
- Contribuire, con azioni e misure, al risparmio energetico e all'utilizzo di fonti rinnovabili;*
- Costruire in modo sicuro e salubre;*
- Ricercare e applicare tecnologie edilizie sostenibili sotto il profilo ambientale, economico e sociale;*
- Utilizzare materiali di qualità certificata ed eco-compatibili;*
- Progettare soluzioni differenziate per rispondere alle diverse richieste di qualità dell'abitare;*
- Garantire gli aspetti di "safety" e di "security" dell'edificio;*
- Applicare la domotica per lo sviluppo di una nuova qualità dell'abitare;*
- Promuovere la formazione professionale, la progettazione partecipata e l'assunzione di scelte consapevoli nell'attività edilizia¹⁹.*

Questi principi rappresentano delle vere e proprie strategie da adottare per il raggiungimento di determinati obiettivi.



Fig. 1.3 Edificio sostenibile

I materiali, le tecniche e l'impatto ambientale

In accordo con la definizione di sostenibilità, ogni materiale, componente o edificio in sé può essere classificato come "verde" se rispetta determinati parametri relativi a:

- Consumo di risorse;
- Inquinamento ambientale;
- Tossicità/qualità dell'aria;
- Prestazioni.

L'impatto economico del settore delle costruzioni è di circa il 10%, con un consumo mondiale di risorse naturali pari al 12% per il prelievo di acque dolci, 25% per la raccolta di legname e 40% per l'uso di materiali ed energia.

Per quanto concerne il consumo annuali di materiali da costruzione le statistiche riportano i seguenti dati²⁰:

- Cemento 2.750 milioni di tonnellate;
- Calcestruzzo 25.000 milioni di tonnellate;
- Legno 3.200 milioni di tonnellate;
- Metalli 1.350 milioni di tonnellate;
- Acciaio 1.000 milioni di tonnellate;
- Carta 300 milioni di tonnellate;
- Plastica 120 milioni di tonnellate;

- Alluminio 32 milioni di tonnellate.

L'uso di quantitativi di materiale come questi comporta diverse conseguenze come l'elevato impatto ambientale in termini di disponibilità di risorse naturali, causando impoverimento della Terra e conseguenti cambiamenti in relazione all'habitat da cui vengono estratti; inoltre, l'estrazione e la lavorazione delle materie prima necessita di grandi quantità di energia, causando oltre che notevoli emissioni di gas inquinanti in atmosfera, anche elevati costi. Costruzione o assemblaggio, così come smaltimento e dismissione, portano con sé una serie non indifferente di costi, emissioni e uso di energia, che rendono così l'intero ciclo di vita dell'edificio uno dei più impattanti a livello globale.

Il requisito di sostenibilità di un edificio è dato dalla sua capacità di essere costruito con materiali in grado di durare per lungo tempo, rendendo meno necessario il prelievo di materia prima dall'ambiente, e che possano essere riutilizzati.

La selezione del materiale migliore deve essere fatta valutando i seguenti aspetti:

- costo;
- qualità tecniche;

- estetica;
- sostenibilità

ma deve anche rispettare determinati criteri di sicurezza e durabilità.

Pertanto, un materiale può essere definito "verde" quando²¹:

- Fa uso di risorse rinnovabili e limita l'uso di carbone e minerali metallici;
- Viene fabbricato mediante uso di materiali riciclati o è esso stesso riciclabile;
- È un materiale del territorio locale (a km 0)
- Non è tossico;
- È efficiente da un punto di vista energetico e in termini di consumo d'acqua;
- Viene percepito gradevole sia al tatto che alla vista.

Senza dubbio, la tecnica del riciclaggio è una di quelle che ad oggi incide maggiormente sulla riduzione di risorse non rinnovabili e dei rifiuti, ma anche sui costi e sui consumi energetici. Tra i materiali riciclabili ci sono:

- Metalli: possono essere riciclati infinite volte se separati precedentemente. L'uso di acciaio riciclato riduce dal 50% al 70%

il consumo di energia e l'emissione di inquinanti, mentre l'uso di alluminio comporta addirittura l'85% di riduzione dell'energia;

- Materie plastiche: la maggior parte di esse può essere riciclata, sempre se separata precedentemente. Tuttavia, spesso la presenza di additivi, coloranti e rivestimenti rendono l'operazione di riciclo più complicata;

- Legno: è uno dei materiali maggiormente riciclati. Tale operazione è possibile se non è stato precedentemente trattato con prodotti tossici e può essere riutilizzato come segatura o per componenti multistrato;

- Vetro: può essere riciclato se separato precedentemente e se incontaminato. In seguito al processo di riciclo presenta all'incirca le stesse caratteristiche del materiale iniziale.

- Calcestruzzo/argilla: sono difficilmente riciclabili a causa della presenza di leganti, come ad esempio la malta, che rendono difficile il processo di separazione. Possono essere utilizzati come riempitivi granulari o inerti se frantumati.

- Pietra: può essere riciclata se frantumata in ghiaia.

Per quel che riguarda il consumo energetico, i settori delle costruzioni e delle industrie edilizie fanno uso di circa il 70%

dell'energia elettrica e del 12% del prelievo di acqua mondiale. In generale, la produzione di energia è fortemente dipendente dall'uso di combustibili fossili come carbone e petrolio, elementi che hanno un enorme impatto sull'ambiente in quanto causa di enormi emissioni di gas serra. Per venire meno ad una situazione tanto allarmante, negli ultimi anni c'è stato un incremento nell'uso di energie derivanti da fonti alternative alle tradizionali fonti fossili, che vengono considerate inesauribili. Le tecnologie di approvvigionamento di energia fanno uso di risorse naturali quali sole, vento ed acqua. L'energia del sole permette di generare elettricità, grazie al sistema fotovoltaico, e calore, grazie al sistema del solare termico; anche l'energia del vento consente l'approvvigionamento di energia elettrica mediante lo sviluppo di centrali eoliche così come l'acqua, grazie al moto delle onde. L'uso di queste fonti di energia alternativa riduce l'inquinamento ambientale poiché emette poche sostanze nocive in atmosfera. La tematica delle fonti rinnovabili ha acquisito sempre più importanza tanto che in Italia nel 2011, con il **Decreto Legislativo 28/2011**, è stato introdotto l'obbligo di utilizzo di fonti rinnovabili in edifici di nuova costruzione e sottoposti a ristrutturazioni

importanti. Inoltre, nel 2018 è stata reso obbligatorio il soddisfacimento del fabbisogno energetico di un edificio (calcolato in fase di progettazione) mediante fonti rinnovabili per almeno il 50%.

Lo sviluppo di tecnologie sempre più avanzate per facilitare e incrementare l'uso di energia derivante da fonti rinnovabili mira al raggiungimento entro il 2020 degli obiettivi fissati con il Protocollo di Kyoto.

L'ottimizzazione delle risorse energetiche, grazie ad un'architettura di tipo sostenibile, oltre a ridurre il consumo di risorse naturali, potrà apportare un miglioramento significativo anche in termini di inquinamento dell'aria. Inoltre, l'utilizzo di materiali di origine naturale contribuirà al miglioramento della qualità dell'aria, priva di particelle contaminanti contenute in materiali sintetici derivanti da processi industriali e chimici, beneficiando così anche la salute di chi vive l'edificio. Infine, una progettazione di tipo sostenibile dà una risposta anche alla problematica dei rifiuti, grazie ai processi di riciclo e reimpiego dei materiali, riducendo così gli sprechi e le emissioni legate alle attività di smaltimento.

Note bibliografiche

¹ Rapporto Brundtland, 1987

² Seminario "Teoria della sostenibilità, sviluppo sostenibile e indicatori di sostenibilità ambientale. Il caso di Venezia", Enzo Tiezzi, Nadia Marchettini (2011)

³ Rudolf Clausius (1822-1888) è stato un fisico e matematico tedesco e fu uno dei fondatori della termodinamica.

⁴ Aurelio Peccei (1908-1984) è stato un imprenditore italiano, manager della FIAT. Partecipò alla Resistenza e nel 1968 costituì a Roma il "Club di Roma", assieme ad alcuni studiosi.

⁵ Il Club di Roma è una associazione non governativa costituita da scienziati, economisti, uomini d'affari, attivisti dei diritti civili, alti dirigenti pubblici internazionali e capi di Stato di tutti e cinque i continenti. La sua missione è di agire come catalizzatore dei cambiamenti globali, individuando i principali problemi che l'umanità si troverà ad affrontare, analizzandoli in un contesto mondiale e ricercando soluzioni alternative nei diversi scenari possibili.

⁶ È un libro realizzato da studiosi e ricercatori del MIT, commissionato dal Club di Roma. Si basa su una simulazione effettuata al computer grazie al software World3, attraverso cui è stato possibile prevedere le conseguenze della continua crescita della popolazione e dei consumi energetici sull'ecosistema terrestre e addirittura sulla stessa sopravvivenza della specie umana.

⁷ Tratto da Prefazione de "I limiti dello sviluppo" a cura di A. Peccei, D.H. Meadows, D.L. Meadows, J. Randers, W.W. Behrens, Biblioteca della EST (Edizioni Scientifiche e Tecniche Mondadori), Gennaio 1972

⁸ Il Rapporto Brundtland (1987)", Alessandra Morelli, 2011 (<https://grenstudioservice.com/il-rapporto-brundtland-1987/>)

⁹ James N. Rosenau (1924-2011) è stato uno scienziato e politico americano, studioso di affari internazionali. È stato presidente dell'International Studies Association (ISA) negli anni 1984-85.

¹⁰ Karl-Henrik Robèrt (1947) è un oncologo, ambientalista e attivista svedese per i movimenti sulla sostenibilità.

¹¹ Herman Daly (1938) è un economista statunitense, noto per essere uno dei maggiori economisti ecologici. È attualmente professore presso il dipartimento di politiche pubbliche dell'Università del Maryland.

¹² *"Dichiarazione Universale sulla Diversità Culturale"*, Art.1 e Art.3, UNESCO, 2001

¹³ Gro Harlem Brundtland (1939) è una politica norvegese attiva su fronte ambientalista.

¹⁴ World Summit on Sustainable Development, Johannesburg, 2002

¹⁵ Conferenza Rio+20: una sfida importante", 2017 (<http://www.minambiente.it/pagina/conferenza-rio20-una-sfida-importante>)

¹⁶ L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile

¹⁷ Report ASVIS "L'Italia e gli obiettivi di sviluppo sostenibile", 2017

¹⁸ "La Bioedilizia ed il naturale ordine delle cose", Maurizio Marna (<http://www.perchebio.com/site/index.php/contenuti/bioedilizia/bioedilizia-cos-e>)

¹⁹ G. Scudo, 2002

²⁰ Appunti di Sostenibilità dei processi e prodotti nei materiali per l'architettura, a.a. 2015/2016

²¹ Idem

2

**Il cemento
nelle
costruzioni**

Introduzione

Il cemento è uno dei materiali che trova maggiore applicazione nell'ambito delle costruzioni ed interessa sia il settore residenziale che quello non residenziale.

La sua origine va ricercata già nella Preistoria, quando l'uomo faceva uso di prodotti naturali ed artificiali, che fungevano da leganti idraulici per creare coesione tra i diversi materiali, svolgendo quindi delle funzioni analoghe a quelle dell'attuale cemento.

Il termine *cemento* deriva dal latino *caementum* ed era usato da Livio e Cicerone per indicare generalmente dei rottami di pietra. Nel corso dei secoli ha mantenuto costante il suo significato fino alla fine del XVIII sec., quando il termine acquisì definitivamente il significato di "*legante di parti altrimenti incoerenti*".

Furono comunque i Romani a mostrare grandi abilità nella realizzazione di leganti idraulici capaci di indurire a contatto con l'acqua: grazie ad essi ci fu larga diffusione di materiali specifici quali polvere di mattone e pozzolane. Quest'ultima fu impiegata assieme ad acqua e calce per la produzione di malte idrauliche, che indurivano e sviluppavano alta resistenza meccanica in assenza di aria. La notevole capacità di questi materiali è testimoniata dai resti che si possono osservare ancora oggi: i ponti sul Tevere, il porto

di Ostia (oggi interrato) risalente al 42 d.C. ma anche costruzioni fuori dall'Italia come il ponte-acquedotto del Gard presso Nimes e l'acquedotto di Segovia in Spagna.

In seguito alla caduta dell'Impero Romano, la qualità del materiale iniziò a diminuire e così la qualità delle costruzioni. Le cause vengono attribuite alla non perfetta cottura della calce e all'uso di sabbie contenenti argilla, ma anche all'abbandono di aggiunta di polvere di mattone alle malte e all'insufficiente compattazione dei getti.

La situazione rimase tale per tutto il Medioevo fino a quando tra il XVII e il XVIII secolo iniziarono ad esserci dei miglioramenti, soprattutto in relazione alle novità che erano state introdotte nel processo di fabbricazione della calce e nei materiali usati per la produzione di malte.

Nel 1756 Jhon Smeaton¹ scoprì che, affinché avesse buone qualità idrauliche, la calce doveva essere prodotta con l'uso di calcari marnosi (contenenti una notevole quantità di argilla 15-25%) e non di calcari puri. Tuttavia, nonostante le importanti proprietà sviluppate dalla calce idraulica, la miscela di calce aerea e pozzolana continuò ad essere di largo uso per ancora diversi anni.

Nello stesso secolo, a quarant'anni di distanza, James Parker² realizzò un nuovo legante idraulico, mediante una cottura a bassa temperatura di materiale calcareo contenente elementi argillosi; questo materiale fu chiamato "cemento romano" in quanto il colore rossastro rimandava alle malte pozzolaniche prodotte dai Romani.

Nel 1818 L.J. Vicat³ sperimentò la realizzazione di una calce idraulica a partire da una miscela di argilla e calcare macinati, cotti tra i 500°C e i 1200°C. Grazie a questa scoperta si facilitava il processo di produzione, essendo i materiali più facilmente reperibili. La novità fondamentale dell'attività di Vicat fu la distinzione tra "naturale" ed "artificiale" attribuita sia alla calce che al cemento, dove il primo è un legante idraulico ottenuto tramite la cottura di un calcare argilloso, mentre il secondo è un legante idraulico ottenuto tramite la cottura di una miscela artificiale di calcare e argilla.

Pochi anni dopo, nel 1824, Joseph Aspdin⁴ diede origine all'attuale "cemento Portland", chiamato così per il colore grigio simil pietra da costruzione che il cemento assumeva in seguito all'indurimento. Tuttavia, lo studio scientifico di questo materiale fu fatto solo alla

fine dell'Ottocento, quando J.C. Johnson nel 1854 si focalizzò sullo studio del rapporto ideale tra calcare e argilla e sulla temperatura ottimale a cui sottoporre i materiali, al fine di ottenere le migliori prestazioni meccaniche possibili del cemento. Grazie a queste sperimentazioni è stato possibile sviluppare quello che è oggi il tradizionale cemento Portland che ebbe larga diffusione in tutto il mondo e contribuì alla riduzione di calce idraulica a favore di quest'ultimo.

Pochi anni dopo, nel 1860, grazie a M. Chatelier, che definì ufficialmente la composizione del cemento, fu possibile avviare la produzione industrializzata.

Ad oggi, il cemento rappresenta uno dei materiali più prodotti al mondo e tra i primi produttori del 2017 ci sono la Cina con 2,4 miliardi di tonnellate, più della metà del cemento mondiale, seguita da India con 270 milioni di tonnellate e Stati Uniti con 86.3 milioni di tonnellate⁵.

Ciclo produttivo e classificazione del cemento

Il ciclo produttivo del cemento Portland consta di diverse fasi:

1. Estrazione delle materie prime: naturali (rocce argillose e calcaree) o artificiali (cenere di pirite).
2. Frantumazione: le materie reperite vengono ridotte di dimensioni per essere lavorate successivamente.
3. Macinazione e omogeneizzazione: quest'operazione ha l'obiettivo di ridurre i materiali ad una dimensione tale da poter essere mescolati bene.
4. Cottura: il materiale viene inserito in forni rotanti circolari, con un diametro di 8-10 metri, le cui dimensioni consentono la discesa della farina cruda all'interno del forno durante la rotazione; la temperatura di cottura non è omogenea, inizialmente è più per arrivare a 1450 °C. Il prodotto finale è il "**clinker**", granuli con dimensioni che vanno dai 3 mm ai 2.5 cm.
5. Raffreddamento: il clinker prodotto viene posizionato su piatti rotanti su cui viene insufflata l'aria per il raffreddamento. Con questo processo il materiale si solidifica.
6. Macinazione: il materiale deve essere ridotto ulteriormente, fino a raggiungere la dimensione di una farina; tale riduzione è necessaria per migliorare la resistenza meccanica. Nella fase di

macinazione, effettuata mediante l'uso di "mulini a sfera", inoltre, viene aggiunto il gesso per ottenere il livello di presa del cemento desiderato.

7. Stoccaggio e imballaggio: vengono prodotti sacchi da 25 kg.

I costituenti principali del clinker Portland sono quattro:

- Silicato bicalcico (C_2S)
- Alluminato tricalcico (C_3A)
- Ferrialluminato tetracalcico (C_4AF)
- Silicato tricalcico (C_3S)

ognuno dei quali presenta diverse caratteristiche, tempi di indurimento e presa, elencate nella seguente tabella (Fig.2.1).

Formula abbreviata	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Percentuale:				
- intervallo	35-65	10-40	0-15	5-15
- media	50	25	8	8
Velocità di reazione con l'acqua	Media	Bassa	Elevata	Media
Contributo alla resist. meccanica:				
- fasi iniziali	Buono	Scarso	Buono	Buono
- finale	Buono	Eccellente	Medio	Medio
Calore idratazione:	Medio	Basso	Alto	Medio

Fig.2.1 Caratteristiche dei costituenti del clinker Portland

Durante la produzione di impasti cementizi è importante controllare la quantità di acqua che viene aggiunta; il rapporto ideale tra acqua e cemento è di 0.5, pertanto l'acqua deve corrispondere alla metà del cemento.

Se in un impasto viene aggiunta troppa acqua, la lavorazione sarà sì più facile ma la conseguenza principale è la rarefazione delle particelle: ciò significa che il cemento inizia a far presa e a indurire, ma i cristalli non si intrecciano perfettamente a causa della distanza eccessiva presente nelle particelle iniziali.

Di conseguenza, la resistenza meccanica diminuisce. Per venire meno a ciò, viene fatto uso di additivi che, sebbene migliorino la lavorabilità (a pari quantità di acqua) hanno un grosso impatto sull'ambiente.

Il processo di produzione di cemento, in generale, è fonte di grandi emissioni di CO₂ in atmosfera e per ridurre tali emissioni è possibile fare uso di cementi di miscela.

Con ***cementi di miscela*** si intendono quei cementi prodotti con l'aggiunta di scarti provenienti da altre lavorazioni e si distinguono in cementi pozzolanici e cementi d'altoforno.

I ***cementi pozzolanici*** derivano dalla miscelazione di Clinker, gesso

e pozzolana finemente macinati. La pozzolana è un materiale con una struttura amorfa ed il suo contenuto può variare dal 35% al 55%. Essa può essere di origine naturale o di origine artificiale. Le prime consistono in rocce di origine vulcanica che si generano in seguito ad un brusco raffreddamento dei lapilli incandescenti prodotti nel corso di eruzioni vulcaniche esplosive e influenzata dall'azione degli agenti atmosferici nel tempo. Le pozzolane artificiali, invece, possono essere *argille torrefatte*, cotte a 500-900 °C, *ceneri volanti*, ceneri prodotte in seguito alla combustione di combustibili fossili con l'aspetto di sferette vetrose. Durante la fase di combustione esse sono allo stato fuso per poi solidificare rapidamente una volta a contatto con l'atmosfera. Le pozzolane artificiali possono presentarsi anche allo stato di fumo di silice, che altro non è che un sottoprodotto delle industrie di silicio. Ciò che rende la pozzolana un materiale fondamentale per lo sviluppo di un cemento efficiente è la sua idraulicità latente, caratteristiche che le permette di reagire con la calce in presenza di acqua favorendo lo sviluppo di resistenza meccanica durante la fase di indurimento. Inoltre, è caratterizzato da migliore lavorabilità, basso calore di idratazione, minore resistenza meccanica a brevi

scadenze e maggiore resistenza meccanica a lunghe scadenze.

I **cementi d'altoforno** invece derivano dalla miscelazione di gesso al 5% e loppa granulata basica d'altoforno tra il 35% e il 95%. Con loppa si intende la scoria liquida scarto di lavorazione della produzione d'acciaio, in particolare della ghisa, che si raffredda rapidamente conservando una struttura vetrosa. I cementi d'altoforno sono più sostenibili rispetto a quelli pozzolanici poiché è necessario solo il 5% di clinker per poter avviare la reazione della loppa con l'acqua. Allo stato vetroso essa reagisce più lentamente con l'acqua, ma più rapidamente in presenza di portlandite, generando così l'indurimento del cemento.

Il cemento viene classificato a seconda della composizione e delle proprietà meccaniche. A tal scopo la verifica viene effettuata producendo una malta, costituita da cemento, acqua e sabbia, che viene gettata all'interno di casseforme e fatta maturare per almeno 24 ore; in seguito viene immersa in acqua a temperatura costante per far in modo che maturi meglio. Una volta completato il ciclo di maturazione, vengono testate la resistenza a compressione e flessione.

A seconda della composizione la norma europea **UNI EN 197**

divide in cementi in cinque categorie principali (Fig.2.2):

- CEM I: cemento Portland costituito da almeno il 95% di clinker e la parte restante da elementi secondari;
- CEM II: cemento Portland di miscela (19 sottotipi) costituito da almeno il 65% di clinker;
- CEM III: cemento d'altoforno (3 sottotipi) costituito da una percentuale di clinker non inferiore al 5% e da una percentuale di loppa d'altoforno che varia dal 36% al 95%. I sottotipi si distinguono a seconda della percentuale di loppa presente: sottotipo A con loppa da 36% a 65%; sottotipo B con loppa da 66% a 80% e sottotipo C con loppa da 81% a 95%.
- CEM IV: cemento pozzolanico (2 sottotipi) costituito da una percentuale di materiale pozzolanico che va dall'11% al 55%. I sottotipi si distinguono in base al contenuto di clinker: nel sottotipo A varia dal 65% all'89%; nel sottotipo B va dal 45% al 64%.
- CEM V: cemento composito (2 sottotipi) ottenuto da aggiunta di clinker (20-64%) di loppa d'altoforno (18-50%) e di materiale pozzolanico (18-50%). I sottotipi variano a seconda del contenuto di clinker: il sottotipo A ha una quantità che varia tra il 40% e il 64% mentre il sottotipo B tra il 20% e il 39%.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)	Composizione (percentuale in massa ^{a)})										Costituenti secondari		
		Costituenti principali												
		Clinker	Loppa di altoforno	Fumo di silice	Pozzolana		Ceneri volanti		Scisto calcinato	Calcare				
K	S	p ^{b)}	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland composito ^{c)}	CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
		CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 -----→										0-5
		CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 -----→										0-5
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico ^{c)}	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 -----→					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 -----→					-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito ^{c)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 -----→			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 -----→			-	-	-	-	0-5	

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.
c) Nei cementi Portland composti CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi composti CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento (per esempio vedere punto 8).

Fig.2.2 Categorie e caratteristiche dei cementi

La norma europea UNI EN 197/1, invece, suddivide i cementi a seconda delle proprietà meccaniche, in particolare a seconda della resistenza a compressione (Fig.2.3):

CLASSE DI RESISTENZA	RESISTENZA COMPRESSIONE (N/mm ²)				TEMPO DI INIZIO PRESA	STABILITA' (espansione)
	Resistenza a breve		Resistenza standardizzata			
	2 giorni	7 giorni	28 giorni			
32.5L	-	≥ 12	≥ 32.5	≤ 52.5	min	mm
32.5N	-	≥ 16				
32.5R	≥ 10	-				
42.5L	-	≥ 16	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	≤ 10
42.5N	≥ 10	-				
42.5R	≥ 20	-				
52.5L	≥ 10	-	≥ 52.5	-	≥ 45	
52.5N	≥ 20	-				
52.5R	≥ 30	-				

Fig.2.3 Suddivisione cementi secondo la UNI EN 197/1

La tabella riporta i requisiti minimi del cemento in termini di resistenza a compressione, espressa in N/mm^2 , ed esprime il valore della tensione di rottura a compressione dopo aver fatto maturare la malta per 28 giorni.

Le lettere N, R ed L indicano rispettivamente cemento a indurimento normale, rapido e lento.

In fase di valutazione del cemento, infine, bisogna tenere in considerazione anche il tipo di sabbia ed il rapporto acqua e cemento utilizzati per la produzione della malta di riferimento.

Usi e applicazioni del cemento

Se miscelato con altri elementi (leganti, inerti ed acqua), il cemento dà origine a malte e calcestruzzi che trovano larga applicazione nell'edilizia. In particolare, il legante principale utilizzato per il calcestruzzo è costituito dai cementi, mentre per le malte può essere differente; malta e calcestruzzo si distinguono principalmente per la differente granulometria degli inerti.

Malta

Per la produzione di malta vengono utilizzati inerti di tipo sabbioso e a seconda della pezzatura si distinguono in malta grossolana, se gli inerti hanno una dimensione massima di 7 mm, e malta fine se invece le dimensioni non superano i 3 mm.

Un'ulteriore distinzione è tra *malte aeree*, quando l'indurimento avviene a contatto con l'aria, o *malte idrauliche*, quando invece avviene in assenza di aria.

La malta viene utilizzata per la realizzazione di intonaci, come malta di allettamento o per la realizzazione di sottofondi nelle pavimentazioni, ed in particolare applicati per la realizzazione di rivestimenti di facciata, scale interne ed esterne, rivestimenti di pareti e pavimenti ma anche lavori artistici.

Quando si parla di intonaco, si fa riferimento ad un rivestimento applicato alle superfici murarie, sia di nuova costruzione che non, ai fini di livellare ed uniformare la superficie. Esso può avere uno spessore che vai dai pochi millimetri a qualche centimetro ed è costituito da diversi strati. La malta in questione è costituita da una miscela di acqua, un legante minerale ed un inerte; inoltre, possono essere presenti delle sostanze additive, quali cellulosa, amido o fumo di silice, con il fine di modificare alcune caratteristiche dell'intonaco.

Per quanto concerne la malta di allettamento, invece, si ha un uso differente: essa viene impiegata per la realizzazione di murature, in particolare costituita da pietra naturale o mattoni in laterizio, ed ha la funzione di tenere uniti e collegare i materiali utilizzati; quest'azione ha scopi ben più specifici, infatti la presenza di malta consente la distribuzione del carico, proveniente dagli elementi sovrastanti, sulla sezione orizzontale del muro. In fase di lavorazione della malta, è di fondamentale importanza prestare attenzione alla quantità di acqua utilizzata nell'impasto e ai tempi di asciugatura, in quanto queste due variabili influenzano in modo determinante la resistenza meccanica della malta stessa.

Infine, l'uso di malta per la realizzazione di sottofondi per le pavimentazioni, comunemente chiamato massetto, prevede l'uso di sabbia, cemento e acqua in diverse proporzioni. Il massetto consiste in uno strato il cui spessore varia dai 6 cm ai 10 cm ed ha principalmente il compito di livellare i pavimenti, ma anche di inglobare le tubazioni di impianti elettrici, idraulici e di riscaldamento.

Le malte, tuttavia, possono essere utilizzate anche per altri scopi, come la chiusura di fessure (malta di stitatura), come elemento di rifinitura (malta di finitura) o come materiale per interventi di riadesione (malta di iniezione).

Calcestruzzo

La produzione di calcestruzzo è caratterizzata dall'uso di inerti quali sabbia, ghiaia, pietrame e simili e viene distinto in *calcestruzzo di massa*, quando gli inerti presentano una pezzatura che non va oltre i 100 mm (eccezionalmente fino ai 300 mm), e calcestruzzo per le *costruzioni in acciaio*, se invece gli inerti hanno una pezzatura massima di 30 mm.

Un'altra distinzione è fatta a partire dal peso volumetrico: si ha un *calcestruzzo normale* o *pesante* se il peso volumetrico oscilla tra 1900 e 2800 kg/m³ o un *calcestruzzo leggero* se il peso volumetrico è compreso tra 300 e 1600 kg/m³.

A differenza della malta, il calcestruzzo ha un'applicazione più ampia, in ragione delle caratteristiche fisiche che sviluppa a seconda dei materiali con cui viene miscelato.

I principali costituenti del calcestruzzo, infatti, sono cemento, acqua, aggregati e additivi (che possono essere acceleranti, ritardanti, fluidificanti, superfluidificanti, antigelo aeranti, disarmanti, impermeabilizzanti e inibitori di corrosione).

Esistono diverse tipologie di calcestruzzo, distinte per le loro **prestazioni** e conseguenti **applicazioni**:

- *High Strength Concrete*: calcestruzzo ad alta resistenza. È caratterizzato da un basso rapporto tra acqua e cemento, uso di inerti di frantumazione e uso di fluidificanti; viene utilizzato per la realizzazione di infrastrutture ed edifici di grandi dimensioni;
- *High Performance Concrete*: calcestruzzo ad alte prestazioni. Presenta un basso rapporto tra acqua e cemento ed una ridotta propensione alla fessurazione da ritiro; fa uso di superfluidificanti,

cemento d'altoforno, inerti di frantumazione e aggiunte minerali. Viene impiegato per la realizzazione di infrastrutture, edifici di elevate dimensioni, contenitori chimici ad alta affidabilità e per stampi meccanici;

- *Densified with Small Particle*: calcestruzzo densificato con piccole particelle. Si tratta di calcestruzzo ad alte prestazioni contenente fumo di silice. È caratterizzato da un basso rapporto tra acqua e cemento, in particolare per l'uso di superfluidificante, e la presenza di pietrisco garantisce una buona adesione con la matrice cementizia. Tuttavia, presenta una bassa tenacità. Viene utilizzato per la costruzione di strutture ad elevata duttilità

- *Reactive Powder Concrete*: calcestruzzo a polvere reattiva. È anch'esso un calcestruzzo ad alte prestazioni contenente fumo di silice, superfluidificante e fibre di acciaio, necessario ad aumentare l'energia di frattura. Trova impiego nell'ingegneria civile per passerelle con solette sottili, nel settore nucleare per la realizzazione di contenitori per rifiuti nucleari e nel settore chimico per serbatoi;

- *Self Compacting Concrete*: calcestruzzo autocompattante e *Self-levelling Concrete*: calcestruzzo autolivellante. Sono

calcestruzzi che non richiedono alcuna compattazione e sono in grado di permeare spazi ridotti, di forma complessa e fittamente armati; sono caratterizzati da un basso rapporto tra acqua e cemento, grazie all'uso di superfluidificanti, da un'elevata quantità di cemento, da filler viscosizzanti e aggregati di diametro non superiore ai 16 mm. Vengono utilizzati per la realizzazione di strutture in cemento armato con grande quantità di armature e sono impiegati inoltre per la produzione di elementi prefabbricati;

- *Fibre Reinforced Concrete*: calcestruzzo rinforzato con fibre. Questa tipologia garantisce la riduzione di fessurazione causata da ritiro plastico ed un miglioramento in termini di resistenza meccanica. Le fibre aggiunte hanno origini polimeriche, vetrose e metalliche. L'utilizzo mira principalmente alla prefabbricazione di elementi sottili e leggeri, non armati e decorativi;
- *Light Concrete*: calcestruzzo leggero. La caratteristica principale sta nella massa volumica, che non supera i 1800 kg/m³ (al contrario del calcestruzzo tradizionale che arriva a 2600 kg/m³). È un calcestruzzo strutturale ma anche funzionale, assicurando isolamento termico e acustico. La leggerezza è data dalla presenza di vuoti, generati da inerti leggeri, additivi aeranti in

ambiente alcalino e aggregati mono-granulari. Viene utilizzato per la prefabbricazione di rivestimenti termoisolanti, per strutture a basse prestazioni e in calcestruzzo armato;

- *High Performance Light Concrete*: calcestruzzo leggero ad alte prestazioni. Per la sua produzione vengono utilizzati cemento 52,5R ed inerte leggero ad alta resistenza, rendendo l'impasto più durevole. È impiegato per la prefabbricazione strutturale di calcestruzzo armato precompresso e pannelli strutturali;

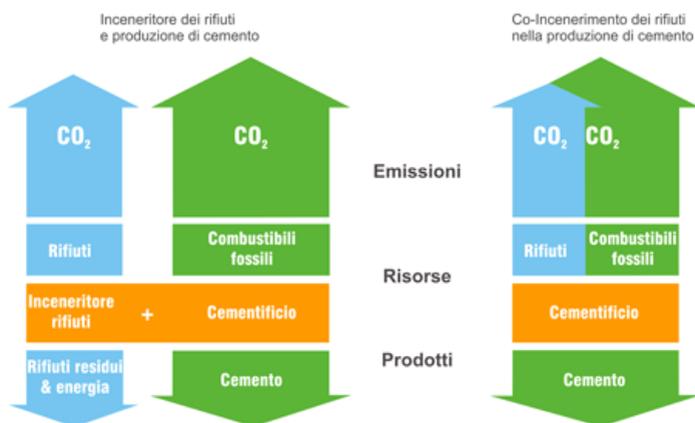
- *C&D Concrete*: calcestruzzo riciclato da costruzione e demolizione. Gli inerti utilizzati nell'impasti derivano da macerie provenienti da demolizioni strutturali e questo tipo di calcestruzzo può anche essere armato, tuttavia, non è un calcestruzzo strutturale ma viene usato per la realizzazione di sottofondi per pavimentazioni stradali e industriali e come filler pozzolanico per il calcestruzzo autocompattante.

Impatto ambientale

Sebbene il cemento sia un materiale largamente utilizzato per il basso costo e per la facilità di reperimento delle materie prime, risulta essere comunque un materiale poco sostenibile e scarsamente riciclato. Infatti, i cementifici sono ogni anno responsabili del 5-8% delle emissioni di CO₂ in atmosfera.

Durante il processo produttivo del cemento le emissioni sono⁶ (Fig.2.4):

- *Reflue, derivanti dal trattamento e depurazione di tutte le acque di prima pioggia raccolte nei piazzali dello stabilimento;*
- *Gassose, in gran parte costituite da vapore acqueo, CO₂ e, nelle misure consentite dai limiti di legge, da altri composti chimici;*
- *Solide, qualunque sia il tipo di residuo utilizzato all'interno del processo produttivo (per recupero di materia ed energia) la cementeria non produce residui solidi di processo.*



L'USO DEI RIFIUTI SOLIDI IN CEMENTIFICIO
PREVIENE L'EMISSIONE DI METANO DALLE DISCARICHE

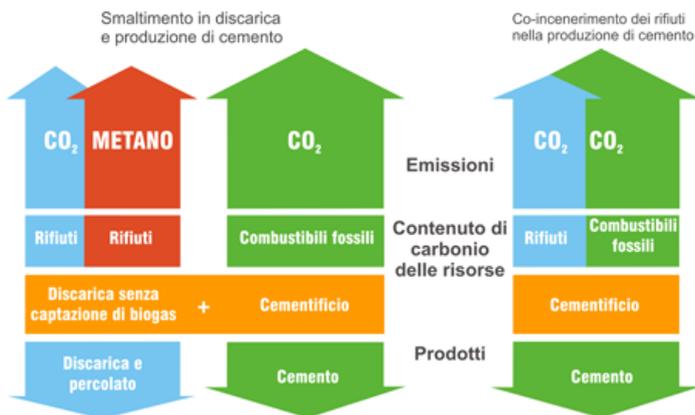


Fig.2.4 Emissioni durante il ciclo produttivo del cemento

La produzione di 1 tonnellata di cemento produce 940 kg di CO₂ (550kg + 390kg in fase di cottura e macinazione del clinker), in particolare a causa della decomposizione del calcare e della conseguente produzione di calce: durante la fase di cottura del carbonato di calcio viene rilasciata una notevole quantità di anidride carbonica, relazionata al combustibile utilizzato. A ciò si aggiunge l'impatto in termini di consumo di aggregati, che attualmente è di circa 20.000 milioni di tonnellate all'anno.

Tuttavia, negli ultimi anni si è assistito ad un piccolo cambiamento: l'uso di biomasse come combustibile e l'uso di materie prime alternative e ceneri derivanti da processi di combustione. Questo tipo di approccio ha apportato una riduzione delle emissioni di CO₂ e *Ad esempio, per ogni tonnellata di CDR utilizzata in cementeria in sostituzione del combustibile tradizionale si emettono in atmosfera circa 1,1 tonnellate di CO₂ in meno. Se poi si considera che se i rifiuti non vengono utilizzati in cementeria devono comunque essere smaltiti, o in termovalorizzatori o in discariche, le cui emissioni si sommerebbero a quelle della cementeria, che continua a funzionare con combustibili tradizionali, si comprende quanto sia vantaggioso il recupero dei residui civili e industriali nei*

forni da cemento.

Oggi, l'industria Italiana del cemento, con un livello di sostituzione termica dei combustibili fossili non rinnovabili con combustibili alternativi, pari a solo l'8%, sta riducendo del 4% le sue emissioni di CO₂ da combustione (circa 340.000 tonnellate l'anno).

Con un livello di produzione annua di 42 milioni di tonnellate di cemento, portare al 20% questo livello di sostituzione significherebbe risparmiare il 10% delle emissioni di CO₂ da combustione (1,1 milioni di tonnellate l'anno).⁷

Si stima che entro il 2050 il processo di cottura del clinker sarà alimentato per il 40% da energia derivante da combustibili fossili (30% carbone + 10% petroleum coke) e per il restante 60% da energia derivante da fonti alternative, tra cui le biomasse. Come conseguenze, potrebbe esserci una significativa riduzione delle emissioni di anidride carbonica, che potrebbe addirittura arrivare al 27% in meno.

Cementi alternativi

Come accennato precedentemente, per rispondere alle crescenti problematiche ambientali, è stato introdotto l'uso di *cementi di miscela* che rappresenta un grande passo verso l'**eco-sostenibilità**. L'aggiunta di elementi derivanti da scarti di altre lavorazioni contribuisce ad un effetto fillerizzante oltre all'apporto di risparmi in termini di energia, poiché non è necessaria un'ulteriore cottura come il clinker, e alla riduzione di costi e processi di smaltimento dei rifiuti.

Oltre al cemento di miscela, anche il *cemento derivante da scarti da demolizione e i prodotti cementizi a base di legno mineralizzato* rispondono in modo positivo alla sfida della sostenibilità ambientale.

Un'importante novità è stata introdotta dal Cinvestav (Centro di ricerca e studi avanzati dell'Istituto Politecnico Nazionale del Messico) di Città del Messico, i cui scienziati hanno sviluppato una nuova tipologia di *cemento a base di geopolimeri*, che contribuiscono a ridurre le emissioni di CO₂ fino all'80% e il consumo di energia durante la fase di produzione fino al 50%. Questo è possibile poiché i geopolimeri di cui è composto, ovvero materiali sintetici a base di alluminosilicati, possono essere trattati

ad una temperatura di soli 750 °C, quasi la metà di quella utilizzata per il cemento Portland. Inoltre, durante la fase produttiva possono essere integrati i sottoprodotti delle attività di tipo industriale, quali ceneri volatili e scorie metallurgiche, comportando una riduzione di emissione di CO₂ pari all'80%. Il risultato di questa attività è un cemento più sostenibile e **José Iván Escalante García**, autore del progetto, ritiene che l'aggiunta di geopolimeri comporti una maggiore resistenza meccanica e agli agenti chimici, una maggiore durata nel tempo e un ridotto impatto ambientale ed economico⁸. Un'altra valida alternativa è il *cemento di riso*: la "lolla di riso" è un materiale di scarto derivante dalla lavorazione di riso ricca di ossido di silicio, fondamentale componente del calcestruzzo. Questo tipo di prodotto ha aspetti negativi e positivi: il materiale, infatti, per poter essere utilizzato deve essere purificato dal carbonio e questo processo richiede una cottura in assenza di ossigeno che va oltre gli 800 °C, causando un grande dispendio di energia; tuttavia, in generale si tratta di un prodotto che riduce significativamente le emissioni di inquinanti atmosferici, fa uso di molta meno acqua e guadagna qualitativamente in termini di corrosione.

Altri materiali a base cementizia in via di sviluppo sono:

- ***Calcestruzzo con copertoni riciclati***: si tratta di un materiale studiato dai ricercatori dell'Imperial College di Londra e dall'European Tyre Recycling Association (ETRA) che fa uso di una fibra polimerica e di gomma ricavata dagli pneumatici. L'aggiunta di questi materiali fa sì che il cemento acquisisca caratteristiche di iper-flessione, rendendosi particolarmente adatto alla realizzazione di strutture antisismiche;

- ***Calcestruzzo capacitivo con PCM (Phase Change Material)***: i materiali a cambiamento di fase *"sono materiali termoregolanti che ottimizzano le fluttuazioni giornaliere della temperatura attraverso la riduzione dei picchi di calore interni, consentendo un risparmio energetico e di climatizzazione dell'ambiente."* Tra questi i più utilizzati sono di origine organica, come paraffine e acidi grassi, e di origine inorganica, quali sali idrati. Negli ultimi tempi si stanno sviluppando elementi come intonaci, blocchi cementizi e calcestruzzi a base di PCM.

- ***Self-healing Concrete***: si tratta di un calcestruzzo in grado di riparare le lesioni grazie alla presenza di batteri capaci di produrre un riempimento resistente di tipo calcareo.

Note bibliografiche

¹ Jhon Smeaton (1724-1792) è stato un ingegnere civile inglese a cui si deve la realizzazione di molti ponti, canali e porti. Fu il primo ingegnere civile "autoproclamato" e viene considerato il padre dell'ingegneria civile. Viene considerata una figura di grande rilievo soprattutto per l'uso di calce idraulica nel calcestruzzo, facendo uso di ciottoli e polvere di mattoni come aggregati.

² James Parker è stato un ecclesiastico britannico e un produttore di mattoni.

³ Louis Vicat (1786-1861) è stato un ingegnere francese, considerato l'inventore del cemento artificiale.

⁴ Joseph Aspdin (1778-1855) è stato un imprenditore e inventore britannico.

⁵ Major countries in worldwide cement production from 2012 to 2017" (www.statista.com)

⁶ Associazione Italiana Tecnico Economica Cemento, Emissioni e impatto ambientale

(<http://www.aitec-ambiente.org/it/Emissionieimpattoambientale/tabid/117/Default.aspx>)

⁷ Idem

⁸ "Il cemento ecologico che viene dal Messico", Ilaria Brambilla (<https://www.greenme.it/abitare/bioedilizia-e-bioarchitettura/4320-il-cemento-ecologico-che-viene-dal-messico>)

⁹ "Risparmio Energetico sui Condizionatori: I Materiali a Cambiamento di Fase (PCM)", Andrea Ursini Casalena (<http://www.mygreenbuildings.org/2010/10/13/risparmi-energetici-condizionatori-materiali-a-cambiamento-di-fase-pcm.html>)

3

Il bio-char

Composizione e produzione

Composizione

Secondo la **European Biochar Certificate**¹ il biochar è *“un materiale eterogeneo ricco di sistemi aromatici e minerali. Esso si deve ottenere per pirolisi di biomassa prodotta in modo sostenibile in condizioni controllate e con tecnologia pulita; deve avere proprietà per cui esso può essere usato per tutti gli scopi che non prevedano una rapida mineralizzazione in anidride carbonica e deve conservare delle caratteristiche che rendano possibile anche il suo uso come ammendante dei suoli”*.

Il bio-char è un carbone vegetale che viene prodotto da materiale di origine vegetale, generalmente da biomassa; nasce inizialmente per essere immagazzinato nel suolo come strumento per ridurre la presenza di anidride carbonica presente in atmosfera.

Esso è composto principalmente da carbone derivante da attività di combustione ed in particolare consiste in un materiale solido ottenuto in seguito all'espulsione di gas leggeri e catrami da una materiale carbonioso durante la fase iniziale della stessa combustione, ovvero durante la fase di pirolisi o carbonizzazione. Ulteriori fasi di combustione efficiente (con o senza depositi di carbone) sono note come reazioni di gassificazione, che si

concludono rapidamente quando viene raggiunta la fase gassosa reversibile della reazione di spostamento del gas d'acqua.

È bene specificare che il termine "bio-char" è differente dal termine "char"; infatti, mentre il primo è legato a specifici materiali, processi ed applicazioni, il secondo viene utilizzato per indicare in modo generico il sottoprodotto ottenuto dal processo di pirolisi di un qualsiasi materiale di origine organica.

Tuttavia, nella letteratura scientifica sono presenti diversi termini che coinvolgono il concetto di bio-char: "Black Carbon", "Carbone attivo", "Charcoal" ma è importante sottolineare che questi spesso sottintendono delle caratteristiche non realmente appartenenti al bio-char.

Pertanto, quando si parla di bio-char è importante sottolinearne la sua natura, esclusivamente organica, e la sua applicazione nel terreno per raggiungere determinati obiettivi in ambito agronomico.

Produzione

Come è stato precedentemente affermato, il bio-char nasce come sottoprodotto di un processo di combustione principalmente di biomassa.

Per biomassa si intende *“una frazione biodegradabile dei prodotti rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall’agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura (studio dei boschi) e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l’acquacoltura, nonché la componente biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani²”*. Si tratta quindi di un insieme di organismi di origine animale o vegetale presenti in un determinato ambiente ed è spesso un concetto associato al settore ecologico e a quello delle energie rinnovabili³.

Negli ultimi anni si fa sempre più uso di energie rinnovabili e la biomassa ricopre un ruolo molto importante in questo contesto: *“Quando si bruciano le biomasse (ad esempio la legna), estraendone l’energia immagazzinata nei componenti chimici, l’ossigeno presente nell’atmosfera si combina con il carbonio delle piante e produce, tra l’altro, anidride carbonica, uno dei principali gas responsabile dell’effetto serra. Tuttavia, la stessa quantità di anidride carbonica viene assorbita dall’atmosfera durante la crescita delle biomasse. Il processo è ciclico⁴”*; questo fa sì che l’uso di biomassa rappresenti un importante traguardo nell’ambito della sostenibilità ambientale.

Da quest'attività di produzione di energia si ottengono dei residui liquidi, gassosi o solidi come, appunto, il bio-char. Quest'ultimo è ottenuto riscaldando la biomassa ad una temperatura compresa tra i 400 °C e gli 800°C in ambiente privo di ossigeno.

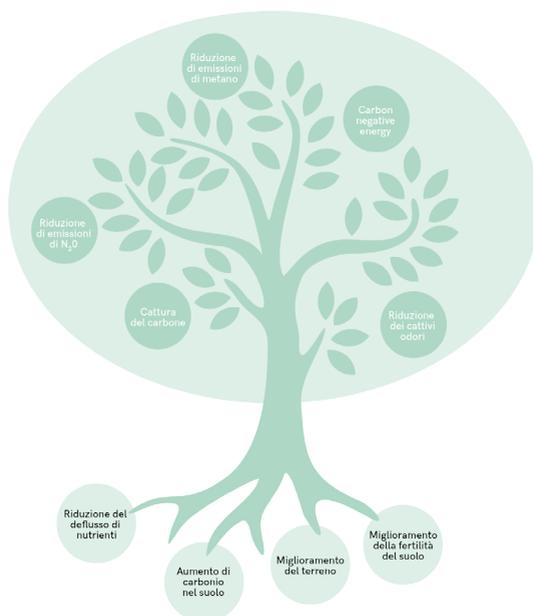
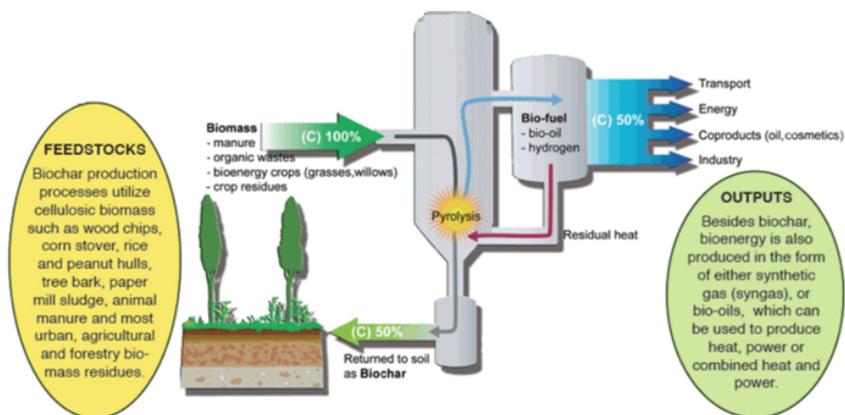


Fig.3.1 Benefits del biochar

Nelle industrie bioenergetiche i principali processi coinvolti nella produzione di bio-char sono la **piròlisi** e la **gassificazione** (Fig.3.2). Entrambi sono soluzioni di combustione atte al recupero di contenuto energetico presente nelle biomasse sotto forma di calore; tuttavia, sono processi che non hanno un rendimento unitario poiché parte dell'energia viene dispersa durante l'azione. Il processo di piròlisi consiste in una decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuta tramite l'applicazione di calore e in assenza di un agente ossidante (solitamente ossigeno). Questo trattamento termico consiste nella conversione energetica di diversi materiali organici che contengono una quantità di acqua maggiore del 15%, come ad esempio le biomasse che derivano da colture arboree o dalle industrie agroalimentari. I materiali vengono decomposti termicamente in modo non ossidativo, ovvero senza alcun apporto di ossigeno dall'esterno.

Il processo di gassificazione invece consiste in una conversione termochimica di un combustibile solido o liquido in un gas di sintesi (ovvero una miscela di gas contenente monossido di carbonio, idrogeno, metano, anidride carbonica) mediante l'uso di un agente gassificante, come ad esempio aria, vapore o ossigeno. In questo

caso, i materiali organici vengono decomposti termicamente in modo controllato e producono un combustibile ed un residuo inerte.



Courtesy of John Lehmann, Cornell University, Ithaca, NY, USA

Fig.3.2 Processo di produzione di bio-char

Il bio-char che si ottiene è un prodotto residuo con elevata porosità (maggiore di 300 m² per grammo), le cui caratteristiche chimico-fisiche dipendono dal tipo di biomassa utilizzato e dalle condizioni termiche in cui avviene il processo. Oltre al bio-char, i prodotti ottenuti sono syngas e bio-oil.

Le principali biomasse utilizzate per questi processi derivano da prodotti che contengono una piccola quantità di acqua quali:

- legname;
- paglie di cereali;
- residui di raccolta di legumi secchi;
- residui di piante oleaginose;
- residui di piante da fibra tessile;
- residui legnosi di potatura di piante da frutto e di piante forestali;
- residui dell'industria agro-alimentare.

La temperatura è una componente che determina in modo considerevole la struttura del bio-char, influenzandone il contenuto di carbonio. Essa è costituita da strati di carbonio a struttura cristallina e non; all'aumentare della temperatura aumenta la cristallinità della struttura, che diventa così più ordinata. Questo avviene in modo proporzionale in condizioni termiche che non

superano gli 800°C, temperatura oltre la quale il bio-char perde di rendimento e non migliora in termini di quantità di carbonio (Fig.3.3).

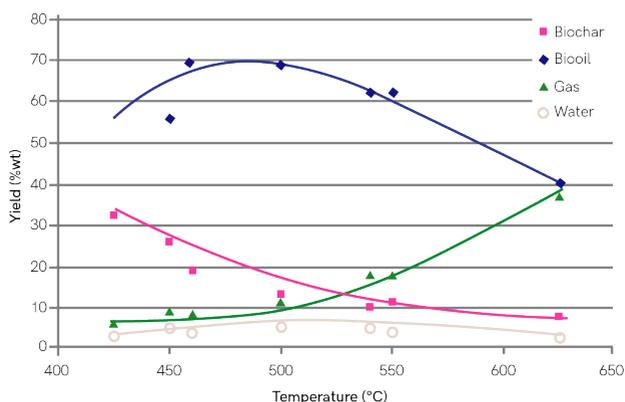


Fig.3.3 Quantità proporzionali di prodotti ottenuti a diverse temperature in un processo di pirolisi di biomassa legnosa (Fonte: IEA, 2007)

In generale, l'uso di biomassa costituisce un grande potenziale per i futuri sviluppi ecologici ed ambientali: entro il 2030 infatti potrebbe rappresentare il 60% del consumo di energia rinnovabile, coprendo così il 20% del consumo energetico complessivo della Terra, contribuendo oltremodo alla problematica dello smaltimento dei

Applicazioni

L'uso del bio-char rappresenta un importante passo in avanti nei confronti delle maggiori problematiche che affliggono la nostra Terra: l'inquinamento ambientale e la sempre più crescente domanda di energia. Nonostante sia emersa maggiormente solo negli ultimi anni, si tratta di una pratica che trova la sua origine nelle civiltà di epoca pre-colombiana, che erano solite interrare il carbone vegetale per incrementare la produttività delle loro terre. A testimonianza di ciò, sono stati trovati suoli molto fertili nelle foreste amazzoniche, chiamate "*terra preta dos Indios*", con elevate concentrazioni di carbone vegetale.

Una delle applicazioni principali, infatti, è quella di ammendante del suolo nel terreno agricolo e, come si afferma nella rivista "**Orticoltura**", "*è l'influenza del bio-char sulle proprietà biologiche del suolo l'effetto che meglio spiega i benefici complessivi del bio-char alle colture. Infatti, le particelle di bio-char ricche di acqua e nutrienti costituiscono dei 'punti caldi' nel suolo, nei quali le popolazioni microbiche e fungine autoctone trovano un microambiente favorevole. La maggior attività biologica conseguente può favorire la competizione con microrganismi patogeni, stimolando in tal modo un effetto soppressivo.*"^{5"} L'uso

del bio-char ha dimostrato un incremento della resa quasi del 20% ed in particolare per prodotti quali grano, riso, lolium, vigna, pioppi, meli e pomodoro, tanto che il Ministero dell'Agricoltura nel 2012 ha aggiunto il bio-char alla lista degli ammendanti ammessi nel settore agricolo, per rispondere ad un'istanza avanzata da ***ICHAR (Associazione Italiana Biochar)***.

Inoltre, il bio-char ha trovato applicazione anche in altre modalità, come ad esempio in Giappone, dove viene utilizzato per risolvere problemi di inquinamento e umidità. L'elevata porosità del materiale fa sì che esso possa assorbire facilmente le sostanze inquinanti presenti in aria e acqua e, di conseguenza, anche l'umidità.

Nel settore edile, invece, viene utilizzato come isolante. Tuttavia, le proprietà di tale materiale fanno sì che possa essere applicato per diverse attività come la *"purificazione dell'acqua potabile e dell'aria (assorbendo sostanze chimiche nocive come formaldeide e benzene), deodorazione degli ambienti (assorbendo gli odori), conservazione dei vegetali ed uso in cucina tramite deodorificazione dell'acqua di cottura."*⁶

Molto interessante è l'applicazione che si sta sviluppando in Italia:

l'uso di biochar nei green roofs, che costituiscono importanti infrastrutture verdi *"capaci di mitigare il clima urbano, il consumo di energia e i flussi idrici."*⁷

Questo materiale trova inoltre importante applicazione nella bioedilizia per la realizzazione di mattoni; le sue caratteristiche lo rendono adatto alla costruzione di percorsi esterni, muri interni, ed in particolare per camere da letto poiché aiuta a rimuovere gli odori fastidiosi, e muri di grande altezza, in quanto risulta essere un materiale leggero.

Se mischiato con la sabbia, il bio-char può essere usato come intonaco; in questo modo, tutte le funzioni sopra citate si uniscono in un unico prodotto, contribuendo al miglioramento della qualità dell'ambiente interno: riduzione dell'umidità, assorbimento degli odori ed ottimizzazione dell'isolamento.

In generale, il bio-char sta diventando un materiale di sempre maggiore interesse per diverse sperimentazioni e una di queste è, senza dubbio, quella relativa all'aggiunta di micro/nano-particelle all'interno di impasti cementizi. Precedenti sperimentazioni hanno dimostrato che le particelle ottenute in seguito al processo di pirólisi di biomasse acquisiscono notevoli proprietà meccaniche,

tanto da poter essere coinvolte nel settore delle costruzioni.

I risultati più interessanti sono stati riscontrati nelle miscele per la realizzazione di compositi a base cementizia: aggiungendo all'impasto piccole percentuali di bio-char, con dimensioni alla scala del micron, i prodotti hanno mostrato una maggiore resistenza a flessione e una maggiore energia di frattura, rendendo il percorso di frattura più tortuoso rispetto a quello del cemento privo di aggiunta.

Una delle problematiche circa l'uso del bio-char negli impasti a base cementizia è la sua elevata capacità di assorbimento: come detto precedentemente le particelle di cui è composto hanno una struttura molto porosa che rende maggiore la necessità di acqua. Di conseguenza, la lavorabilità del materiale diventa più difficile essendo l'impasto più denso rispetto a quello tradizionale. Tuttavia, questa caratteristica fa sì che le particelle assorbano una determinata quantità di acqua che viene poi rilasciata durante la fase di idratazione iniziale, favorendo il processo di polimerizzazione del calcestruzzo e rendendo il materiale più rigido e resistente. Si tratta di una proprietà che ne favorisce l'indurimento ma al contempo è necessario calibrare le percentuali

di aggiunta, onde evitare un rapido addensamento dell'impasto che rende più complicata la lavorazione.

È bene sottolineare che le prestazioni dei prodotti ottenuti da bio-char dipendono anche dall'origine della biomassa utilizzata.

"Il biochar è un sistema che si presta per una gestione intelligente della biomassa a beneficio della collettività"

(**Johannes Lehmann** - College of Agriculture and Life Sciences della Cornell University, Stati Uniti)

La scelta d'uso di questo materiale è data da molti fattori positivi:

- risponde all'allarme rifiuti, che è sempre in crescendo, poiché fa uso di scarti organici di diversa natura;
- la materia prima da cui è ottenuto (gli scarti) serve per produrre energia;
- le caratteristiche delle particelle ottenute, in seguito all'attività di combustione degli scarti, conferiscono proprietà rilevanti ai vari prodotti in cui viene applicato;
- ha un costo basso;
- riduce le emissioni di CO₂.

*“In uno studio volto a valutare il bilancio energetico e le emissioni associate al processo pirolitico con produzione di biochar (Gaunt & Lehmann, 2008), è risultato un **output energetico netto positivo e competitivo rispetto ad altre tecnologie energetiche**, nonostante l’impiego del biochar come ammendante anziché come combustibile in sostituzione di risorse fossili. La combinazione di produzione di bioenergia con impiego di carbone vegetale nel suolo risulta dunque una **soluzione vincente**.⁸”*



Fig.3.4 Polvere di bio-char

Note bibliografiche

¹ The European Biochar Certificate è un certificato sviluppato dagli studiosi del Biochar con lo scopo di determinare gli standard europei industriali. Grazie a questo certificato è possibile verificare la sostenibilità del Biochar prodotto e l'impronta ecologica in termini di emissioni di CO₂.

² Direttiva Europea 2009/28/CE.

³ <https://it.wikipedia.org/wiki/Biomassa>

⁴ <http://www.rinnovabili.it/energia/biomassa/definizione-biomassa/>

⁵ "ORTICOLTURA. Speciale semina e trapianto", n.1, Gennaio (2014)

⁶ <http://www.openfields.it/sito/wp-content/uploads/2014/01/140128-simposiobiochar.pdf>

⁷ Idem

⁸ "Dal Simposio nuove evidenze delle virtù del biochar", energoclub.org

4

L'attività sperimentale

Malte realizzate con
additivazione di bio-char

Introduzione

L'attività di laboratorio, svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino si è incentrata sull'applicazione di bio-char per la produzione di malta a base cementizia. Il bio-char in questione deriva da conifere, è stato ottenuto tramite un processo di gassificazione, che consente di trasformare materiali con elevato contenuto di carbonio, come la **biomassa**, in sostanze quali monossido di carbonio, idrogeno ed altri composti di tipo gassoso.

L'applicazione di bio-char come "*inerte verde*" in compositi a base cementizia rappresenta un importante passo nell'iter del processo produttivo dei materiali edilizi: esso non solo contribuisce a migliorarne le prestazioni meccaniche ma risponde in modo intelligente al sempre più crescente bisogno di smaltire i rifiuti e identificandosi come una soluzione promettente anche da un punto di vista energetico in quanto limita l'uso di risorse naturali non rinnovabili.

Il presente lavoro segue la scia di precedenti sperimentazioni basate sull'uso di bio-char ottenuto da altre tipologie di rifiuti, i quali hanno dimostrato dei risultati piuttosto promettenti (Restuccia, 2015 - Cosentino, 2017).

I test effettuati sono:

- analisi granulometrica;
- analisi BET (analisi dell'area superficiale delle micro-particelle);
- analisi di assorbimento dell'acqua;
- analisi FE-SEM;
- prova a flessione su tre punti;
- prova a compressione

grazie ai quali è stato possibile determinare rispettivamente la dimensione delle particelle del bio-char, la capacità di assorbimento e il comportamento meccanico in presenza di carichi.



Fig.4.1 Bio-char

Materiali e metodi

Materiali

Durante lo svolgimento dell'attività sperimentale sono stati realizzati provini di malta a base cementizia con l'aggiunta di bio-char in differenti percentuali, in relazione al peso del cemento.

I materiali utilizzati per la preparazione degli impasti cementizi sono:

- *Cemento*: Portland di tipo I "i.tech **ULTRACEM 52,5 R**" di colore grigio, prodotto da Italcementi S.p.A. Si tratta di un cemento ultrasensibile, ad alte prestazioni, contenente tra il 95% e il 100% di clinker e tra lo 0% e il 5% di costituenti secondari, conformemente alla composizione prescritta dalla norma UNI EN 197-1, e dotato di marcatura CE come richiesto dal Regolamento Europeo n. 305/2011. I requisiti chimici, fisici e meccanici sono riportati nelle seguenti Tabelle (numerare);

- *Acqua*: acqua deionizzata;

- *Sabbia*: sabbia normale, CEN, EN 196-1, conforme alla ISO 679: 2009;

- *Bio-char*: materiale ottenuto tramite gassificazione di biomassa legnosa (conifere); si tratta di un processo chimico che provoca una degradazione termica in presenza di temperature elevate,

tra i 700 °C e gli 800 °C. Le aggiunte di Biochar negli impasti corrispondono all'1%, al 2% e al 5% rispetto al peso del cemento. Le tabelle seguenti (Tab. 4.1, 4.2, 4.3) riportano le caratteristiche principali ottenute dalle analisi effettuate precedentemente dalla NEOTRON S.p.a.

REQUISITI CHIMICI

Perdita a fuoco	≤ 5.0%
Residuo insolubile	≤ 5.0%
Solfati (come SO ₃)	≤ 4.0%
Cloruri	≤ 0.10%

Tab. 4.1

REQUISITI FISICI

Tempo di inizio presa	≥ 45 min
Espansione	≤ 10 mm

Tab. 4.2

REQUISITI MECCANICI

Resistenze alla compressione

2 giorni	≥ 30.0 MPa
7 giorni	N.R
28 giorni	≥ 52.5 MPa

Tab. 4.3

Metodi

Per verificare le caratteristiche principali del cemento sostenibile oggetto di studio, sono stati realizzati dei compositi a base cementizia, nello specifico provini di malta, con l'aggiunta di bio-char sotto forma di micro-particelle. Questo è stato prodotto tramite un processo di gassificazione con un impianto "Spanner-Joos" di tipo SJHV-03, costruito dalla *Spanner Re² GmbH*. Si tratta di un impianto che esegue diverse operazioni:

- Produzione di gas di legna derivante da cippato vergine;
- Combustione del gas di legna in un cogeneratore;
- Emissione della corrente elettrica prodotta in rete;
- Utilizzo del calore prodotto per il riscaldamento e per l'essiccazione del cippato.

Alla fine delle diverse fasi si è ottenuto il bio-char utilizzato per la sperimentazione.

Prima di procedere alla realizzazione dei provini, è stata effettuata un'ulteriore caratterizzazione fisica del suddetto materiale, tramite un'analisi granulometrica, con lo scopo di verificarne le dimensioni e la loro frequenza. L'operazione è stata svolta mediante l'uso del granulometro laser *Analysette 22 compact* della *Fritsch*, presso

il DISAT (Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia) del Politecnico di Torino.

Innanzitutto, si è proceduto a diluire e mischiare una piccola quantità (8g) di bio-char nell'etanolo per poi mettere la soluzione ottenuta nel bagno a ultrasuoni per dieci minuti.

Nel frattempo, è stata preparato il granulometro laser tramite un processo di pulizia: la cella portacampione (Fig.4.2) è stata pulita per cinque volte con acqua e per tre volte con etanolo. Una volta terminato il bagno a ultrasuoni, la soluzione di bio-char+etanolo è stata versata a piccole riprese all'interno della cella portacampione, stando attenti a raggiungere una percentuale minima di diluizione del campione del 7%, senza mai superare il 20%.

Al fine della sperimentazione, l'analisi granulometrica ha permesso di ottenere le diverse misure delle particelle e il relativo numero di oscillazioni effettuate nell'intervallo di tempo unitario, con l'obiettivo di garantire una procedura standard per l'applicazione di bio-char durante la fase di miscela di cemento.



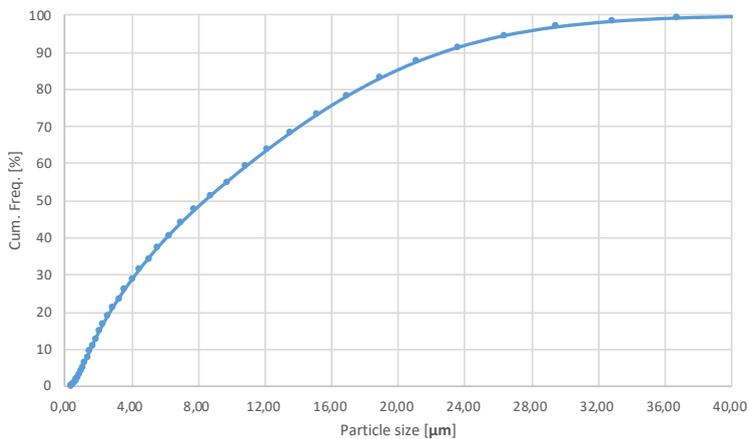
Fig.4.2 Cella portacampione

Nella tabella seguente (Tab.4.4) sono riportati i valori estratti dall'analisi granulometrica, i quali evidenziano le dimensioni minori e maggiori dei diametri delle particelle e la frequenza delle oscillazioni durante l'intervallo delle otto misurazioni. Dai valori evidenziati in tabella è calcolato che la dimensione diametrale media delle particelle di bio-char corrisponde a 15,04 μm .

Date	Time	MesNr	Class Low	Size	Class High	Frequ.	Cum.Frequ.
06-05-2018	12:43	8	0,29	0,31	0,33	0,05	0,05
06-05-2018	12:43	8	0,33	0,35	0,37	0,06	0,12
06-05-2018	12:43	8	0,37	0,39	0,41	0,08	0,20
06-05-2018	12:43	8	0,41	0,44	0,46	0,12	0,32
06-05-2018	12:43	8	0,46	0,49	0,51	0,19	0,51
06-05-2018	12:43	8	0,51	0,54	0,57	0,27	0,78
06-05-2018	12:43	8	0,57	0,61	0,64	0,38	1,16
06-05-2018	12:43	8	0,64	0,68	0,72	0,50	1,66
06-05-2018	12:43	8	0,72	0,76	0,80	0,64	2,31
06-05-2018	12:43	8	0,80	0,85	0,89	0,79	3,09
06-05-2018	12:43	8	0,89	0,95	1,00	0,94	4,03
06-05-2018	12:43	8	1,00	1,06	1,11	1,09	5,12
06-05-2018	12:43	8	1,11	1,18	1,25	1,24	6,36
06-05-2018	12:43	8	1,25	1,32	1,39	1,39	7,76
06-05-2018	12:43	8	1,39	1,47	1,55	1,54	9,30
06-05-2018	12:43	8	1,55	1,65	1,74	1,68	10,97
06-05-2018	12:43	8	1,74	1,84	1,94	1,81	12,78
06-05-2018	12:43	8	1,94	2,05	2,17	1,92	14,70
06-05-2018	12:43	8	2,17	2,30	2,42	2,03	16,73
06-05-2018	12:43	8	2,42	2,56	2,71	2,13	18,86
06-05-2018	12:43	8	2,71	2,86	3,02	2,24	21,10
06-05-2018	12:43	8	3,02	3,20	3,38	2,36	23,46
06-05-2018	12:43	8	3,38	3,58	3,77	2,49	25,95
06-05-2018	12:43	8	3,77	4,00	4,22	2,64	28,59
06-05-2018	12:43	8	4,22	4,46	4,71	2,79	31,37
06-05-2018	12:43	8	4,71	4,99	5,26	2,94	34,31
06-05-2018	12:43	8	5,26	5,57	5,88	3,08	37,39
06-05-2018	12:43	8	5,88	6,23	6,57	3,21	40,60
06-05-2018	12:43	8	6,57	6,96	7,34	3,35	43,95
06-05-2018	12:43	8	7,34	7,77	8,20	3,50	47,44
06-05-2018	12:43	8	8,20	8,68	9,16	3,68	51,12
06-05-2018	12:43	8	9,16	9,70	10,24	3,90	55,02
06-05-2018	12:43	8	10,24	10,84	11,44	4,16	59,18
06-05-2018	12:43	8	11,44	12,11	12,78	4,43	63,61
06-05-2018	12:43	8	12,78	13,53	14,28	4,68	68,29
06-05-2018	12:43	8	14,28	15,11	15,95	4,87	73,17
06-05-2018	12:43	8	15,95	16,89	17,82	4,94	78,11
06-05-2018	12:43	8	17,82	18,87	19,91	4,83	82,93
06-05-2018	12:43	8	19,91	21,08	22,25	4,48	87,42
06-05-2018	12:43	8	22,25	23,55	24,86	3,91	91,33
06-05-2018	12:43	8	24,86	26,31	27,77	3,17	94,50
06-05-2018	12:43	8	27,77	29,40	31,03	2,34	96,84
06-05-2018	12:43	8	31,03	32,85	34,66	1,55	98,39
06-05-2018	12:43	8	34,66	36,70	38,73	0,90	99,29
06-05-2018	12:43	8	38,73	41,00	43,27	0,44	99,73
06-05-2018	12:43	8	43,27	45,81	48,34	0,15	99,88

Tab.4.4

La curva granulometrica (Tab.4.5) mostra come ci sia uniformità tra le particelle di bio-char analizzato, consentendo così la ripetibilità delle miscele. Inoltre, il grafico riporta che più del 50% del particolato analizzato ha una dimensione che va da 0 a 8 micron.



Tab.4.5

Per approfondire ulteriormente le prestazioni del bio-char è stata fatta un'analisi per verificare la capacità di assorbimento dell'acqua; sono stati effettuati tre test diversi, ognuno con un tipo di filtro differente. Nel Test 1 è stato utilizzato un filtro di carta e dopo le 48 ore di riposo si è ottenuto un valore di assorbimento pari a 2,61 g di acqua per ogni g di bio-char; per il Test 3 invece è stato utilizzato un filtro di cellulosa, che permette un assorbimento migliore dell'acqua superficiale rispetto al filtro di carta, e il valore ottenuto è 1,53 g di acqua per ogni g di bio-char. Il Test 2 invece rappresenta un ibrido tra il Test 1 e il Test 3 e questa metodologia ha portato ad un valore di 2,27 g di acqua assorbita per ogni g di bio-char. I tre risultati (Fig.4.3) presentano molta dispersione tra loro, rendendo l'analisi di più difficile comprensione.

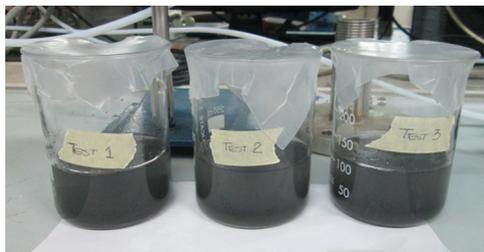


Fig.4.3 Test di assorbimento dell'acqua

Determinate le caratteristiche fisiche del bio-char, si è passati alla preparazione dei provini di malta.

Al fine di valutare l'influenza delle micro-particelle, sono state elaborate ricette con differenti percentuali in rapporto al peso del cemento, da comparare con un provino privo di alcuna aggiunta di bio-char (Tab.4.6):

Nome	% biochar	N° Provini 7 giorni	N° Provini 28 giorni
Mortar	0	3	3
Mortar_BC_1%	1	3	
Mortar_BC_2% impasto tradizionale	2	3	3
Mortar_BC_2%_S impasto a secco	2	6	
Mortar_BC_2%_SOST impasto tradizionale - sostituzione	2	3	
Mortar_BC_2%_SOST_S impasto a secco - sostituzione	2	3	
Mortar_BC_5%_S impasto a secco	5	3	3
Totale		24	9

Tab.4.6

Gli impasti sono stati effettuati con un mescolatore planetario seguendo le proporzioni stabilite dalla normativa **UNI EN 196-1:2005**; per la produzione di tre provini (dimensioni 40x40x160mm) sono stati quindi utilizzati 450g di cemento, 225g di acqua (corrispondente al rapporto $a/c=0.5$), 1350g di sabbia standard e bio-char nelle percentuali sopra citate. Il procedimento svolto per a realizzazione di tutti i provini è il seguente:

1. È stata messa in bolla e tarata la bilancia tecnica da laboratorio;
2. Sono stati pesati tutti i materiali necessari (è consigliabile pesare prima le polveri e successivamente l'acqua, per evitare che questa evapori) (Fig.4.4, Fig.4.5);

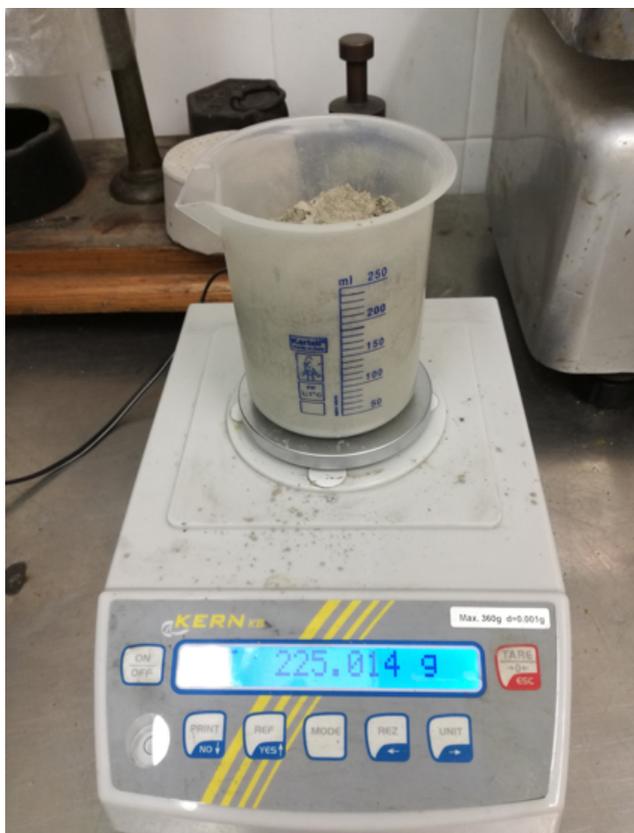


Fig.4.4 Pesatura del cemento

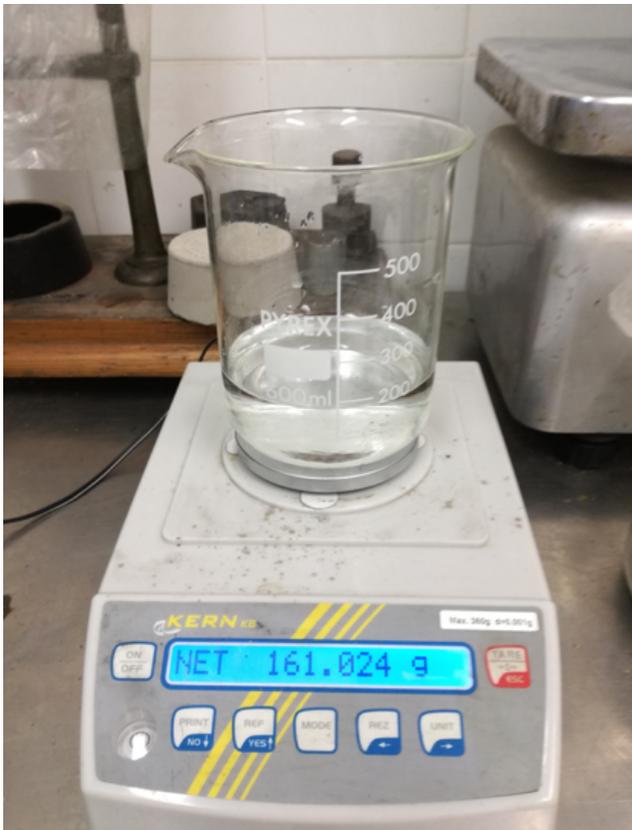


Fig.4.4 Pesatura dell'acqua

3. È stato versato prima il cemento e successivamente l'acqua all'interno della bowl del mescolatore (Fig.4.6);



Fig.4.6 Mescolatore planetario

4. È stato attivato il mescolatore a velocità "bassa" per 30 secondi (Fig.4.7);



Fig.4.7 Miscelazione

5. È stata versata l'intera quantità di sabbia nei successivi 30 secondi (stando attenti a non eccedere con i tempi) (Fig.4.8);



Fig.4.8 Aggiunta di sabbia

6. La velocità è stata cambiata da "bassa" ad "alta" e l'impasto è stato mescolato per altri 30 secondi;
7. È stato stoppato il mescolatore per 90 secondi: nei primi 30 sono stati rimossi i residui di materiale rimasti sulle pareti della bowl, nei restanti 60 l'impasto è stato lasciato a riposo;
8. Il mescolatore è stato riattivato ad alta velocità per altri 60 secondi.

L'aggiunta di bio-char all'impasto è stata fatta con due metodologie differenti: in acqua e a secco. Nella prima procedura l'acqua è stata aggiunta al bio-char e mescolata (Fig.4.9): inizialmente è stato fatto uso del bagno a ultrasuoni (Fig.4.10) per 5-10 minuti per rendere più omogeneo il composto; tuttavia, questo provocava, al contrario, deposito di materiale sul fondo del contenitore, rendendo l'azione non conveniente. Pertanto, negli impasti successivi, si è preferito procedere ad una miscelazione di tipo manuale per circa 3 minuti. La seconda procedura ha previsto, invece, la miscelazione di Bio-char con il cemento direttamente nella bowl del mescolatore (Fig.4.11). Queste due metodologie hanno mostrato risultati differenti in fase di verifica meccanica.



Fig.4.9 Aggiunta di bio-char in acqua



Fig.4.10 Bagno a ultrasuoni



Fig.4.11 Aggiunta di bio-char nel cemento

Completata la fase di miscelazione (Fig.4.12), l'impasto ottenuto è stato versato in due metà all'interno della cassaforma in acciaio (Fig.4.13), contenente tre sezioni da 40 mm x 40 mm x 160 mm, precedentemente collegata alla *tavola a scosse* (Fig.4.14), e compattato grazie a 60 colpi (sobbalzi) ripetuti per due volte.



Fig.4.12 Impasto terminato



Fig.4.13 Cassaforma in acciaio



Fig.4.14 Tavola a scosse



Fig.4.15 Impasto versato e livellato

I provini conservati nella cassaforma sono stati successivamente posizionati su una base orizzontale, all'interno di un ambiente umido, con temperatura di $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ e con umidità relativa non inferiore al 90%, per 24 ore. Dopo essere stati sformati, sono stati posizionati all'interno di una vasca contenente acqua a temperatura $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, con la superficie di getto rivolta verso l'alto, dove sono stati fatti maturare fino al momento delle prove di resistenza a 7 e a 28 giorni (Fig.4.16).



Fig.4.16 Maturazione dei provini in vasca

Test di resistenza meccanica

Prima di eseguire le prove di resistenza, è stato effettuato un intaglio sulla mezzeria di una delle superfici ortogonali alla superficie di getto, pari a 12 mm di profondità e 4 mm di spessore.

Prove a flessione su tre punti

Per ogni provino di malta è stato effettuato un test di flessione a tre punti, utilizzando la macchina a singola colonna *Zwick Line-Z010* (Fig.4.17), a controllo di spostamento, con una cella di carico pari a 50 kN.

Le prove sono state eseguite con il controllo dell'apertura dell'intaglio CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) tramite l'uso dell'estensimetro, la velocità utilizzata è pari 0,01 mm/min, mentre la distanza tra gli appoggi è di 140 mm.

Il modulo di rottura (MOR) calcolato consente di valutare la resistenza a flessione su provini aventi dimensioni 40x40x160 mm; tale valore rappresenta il limite, in termini di carico, che un provino può sostenere fino al momento della rottura ed è calcolato con la seguente formula:

$$\sigma_{f, max} = F_{max} \cdot \frac{3L}{2bh^2} \quad [MPa]$$

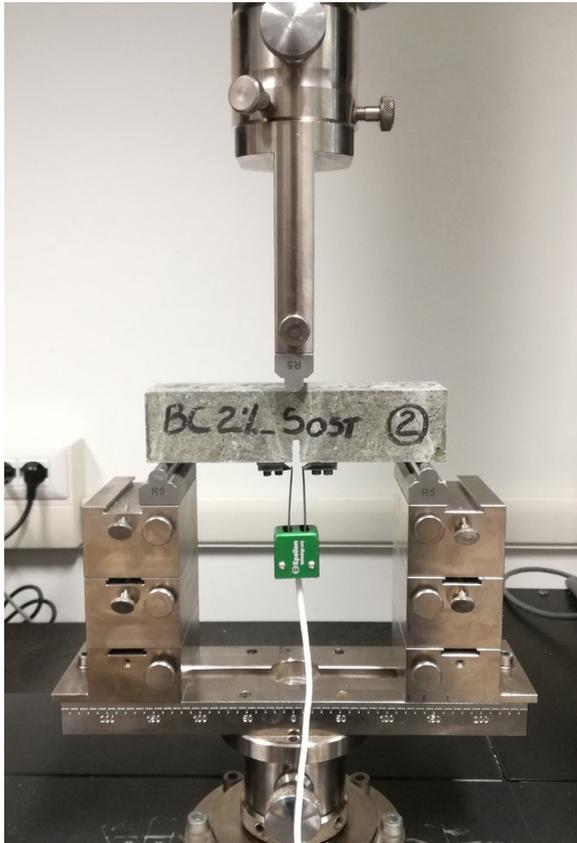


Fig.4.17 Prova a flessione su tre punti

dove:

- F_{MAX} : massima forza applicata sul provino all'istante del crollo;
- L: distanza effettiva tra gli appoggi;
- b: larghezza del provino;
- h: altezza del provino sotto il punto di applicazione del carico.

Prima di procedere all'inizio delle **prove a flessione su tre punti**, ogni provino è stato preparato con l'applicazione di due basette (Fig.4.18), facendo uso di una colla di tipo z70, sulla superficie dell'intaglio, a cui sono stati ancorati due coltellini (Fig.4.19) necessari all'inserimento dell'estensimetro. Una volta completata questa fase, il provino è stato posizionato seguendo le indicazioni prestabilite: l'intaglio rivolto verso il basso e allineato al punzone della macchina; il provino deve inoltre trovarsi in posizione centrata, ponendo attenzione alla distanza che deve avere rispetto agli estremi degli appoggi (1,5 cm da entrambi i lati).



Fig.4.18 Applicazione delle basette



Fig.4.19 Applicazione dei cortellini

Prove a compressione

Terminata la prova a flessione, i provini sono stati rotti a metà lungo la direzione dell'intaglio per eseguire le **prove a compressione** con l'uso della *macchina "servoidraulica" MTS* della *Zwick/Roell* (Fig.4.20), con una cella di carico da 100 kN.



Fig.4.20 Prova a compressione

Il test è stato svolto con una velocità di applicazione di 2400 N/s su una porzione di 40x40x40mm; il valore di σ_c calcolato rappresenta il limite di forza che un provino, sottoposto ad un carico, può sostenere fino al momento della rottura ed è calcolato con la seguente formula:

$$\sigma_{c, max} = \frac{F_{max}}{A} \quad [MPa]$$

dove:

- F_{MAX} : massima forza applicata sul provino;
- A: area del provino sottoposta al carico.

Introduzione alla meccanica della frattura

La meccanica della frattura è quella parte della meccanica interessata allo studio degli effetti delle incrinature, delle crepe e dei difetti in generale di un materiale sullo sforzo applicato ad un corpo, con lo scopo di verificarne le condizioni di cedimento. Lo studio e la sperimentazione su provini a piccola scala, permette un'analisi microscopica, mediante cui è possibile verificare la presenza di difetti interni, e che può consentire di fare ipotesi su elementi a scala maggiore circa la frattura dei corpi. Questa disciplina si concentra sull'analisi delle tensioni che si generano in presenza di fessure e tiene conto di concetti quali sforzo ed energia di frattura; i valori utili alla valutazione di un eventuale cedimento sono le tensioni e le forze applicate. Pertanto, le attività di sperimentazione di questo tipo offrono la possibilità di prevedere il comportamento meccanico di un materiale tramite l'analisi della tenacità a frattura, ovvero la capacità di un corpo di assorbire energia e deformarsi in modo plastico prima della rottura, e l'analisi delle tensioni. Grazie alla meccanica della frattura è possibile studiare prototipi con particolari caratteristiche geometriche e strutture del materiale, in grado di rispondere positivamente all'applicazione di sforzi o sollecitazioni di notevole

entità.

Nel settore del cemento uno studio di questo tipo è l'ideale per classificare la tipologia del materiale; in particolare, è fondamentale una prova a compressione in seguito alla quale è possibile esaminare la relazione tra la tensione subita dal materiale e la deformazione generata.

$$\text{tensione } \sigma = \frac{F}{A_0} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

dove F corrisponde alla forza applicata mentre A₀ è la superficie su cui viene applicata tale forza;

$$\text{deformazione } \varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} [mm]$$

Tendenzialmente, applicando una forza il materiale subisce una deformazione reversibile che scompare nel momento in cui viene rimossa la forza applicata. Tuttavia, se la sollecitazione va oltre un determinato valore, il materiale subisce una deformazione irreversibile; questo porta alla definizione della Legge di Hook secondo cui *l'allungamento subito da un corpo elastico è*

direttamente proporzionale alla forza ad esso applicata.

I valori ottenuti dalle formule precedenti permettono di calcolare il modulo elastico E , o anche detto modulo di Young, che esprime il rapporto tra la tensione applicata e la deformazione prodotta:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (MPa)$$

Se il carico applicato è eccessivo, il materiale sotto sforzo perde di rigidità fino alla tensione di picco, risultando così più fragile. Tra questi, il cemento è uno di quei materiali che assume un comportamento fragile mentre duttilità e resistenza a trazione sono parametri che dipendono dalle dimensioni geometriche della struttura.

Il test a compressione permette di calcolare la resistenza a frattura, un parametro che esprime la relazione tra la lunghezza della fessura (la capacità intrinseca del materiale di resistere alla crescita della fessura) e lo stress con cui una lunghezza critica della fessura provoca il collasso.

Nel momento in cui la deformazione aumenta in modo drastico si assiste ad una separazione tra lo stato elastico e lo stato plastico,

generando la cosiddetta tensione di snervamento, momento oltre il quale si ha una rottura senza alcuna deformazione.

Le prove a cui vengono sottoposti i provini della presente attività sperimentale consentono di ottenere i valori di cui sopra, permettendo al progettista della struttura di valutare l'applicazione migliore del materiale scelto, prevedendone il comportamento in caso di particolari carichi.

Risultati

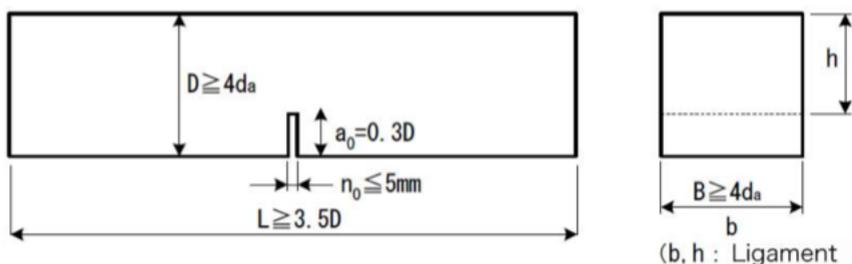
L'obiettivo principale della sperimentazione è l'ottenimento di compositi a matrice cementizia sostenibili che garantiscano le stesse, o migliori, prestazioni in termini di resistenza meccanica rispetto alle malte tradizionali.

L'aggiunta di Biochar con differenti percentuali rispetto al peso del cemento e le differenti metodologie impiegate per confezionare i provini hanno permesso di ottenere risultati interessanti.

Risultati delle prove a flessione

Secondo lo ***Japan Concrete Institute Standard*** la prova di flessione su tre punti risulta essere il tipo di prova più adatto per la determinazione dell'energia di frattura GF, necessaria a misurare la quantità di energia assorbita fino al momento della rottura in due del provino. Infatti, a differenza della prova a trazione uniassiale, che invece rappresenta il metodo più diretto per ottenere l'energia di frattura, quella a flessione garantisce maggiore stabilità per l'esecuzione per le prove su campioni quasi fragili. Il documento sopra citato fornisce tutte le indicazioni da rispettare per lo svolgimento della prova: innanzitutto, il provino deve essere prismatico e con sezione rettangolare e deve avere

un intaglio sulla mezzeria pari a 0,3 volte l'altezza del provino. La seguente figura mostra le caratteristiche principali da rispettare:



Dove:

- L'altezza D del provino deve essere maggiore o uguale a 4 volte la dimensione massima dell'aggregato;
- La larghezza B del provino deve essere maggiore o uguale a 4 volte la dimensione massima dell'aggregato;
- La distanza tra gli appoggi (S) deve essere pari a 3 volte l'altezza D del provino, mentre la lunghezza L deve essere maggiore o uguale a 3.5 volte l'altezza D ;
- L'altezza a_0 deve essere pari a 0.3 volte l'altezza D e l'apertura r_0 non deve essere superiore a 5 mm.

L'apertura della frattura CMOD e il carico corrispondente F sono registrati fino a quando il provino fessurato non si rompe per effetto del peso proprio. Nella valutazione complessiva è necessario tenere conto, oltre che del carico applicato, anche del peso del provino e di alcuni componenti dell'attrezzatura che agisce su di esso.

Dai valori ottenuti in seguito alle prove, l'energia di frattura può essere calcolata con le seguenti espressioni:

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} = G_{F0} + G_{Fcorr} \quad \left[\frac{N}{mm} \right]$$

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L} m_1 + 2m_2 \right) g \cdot CMOD_C \quad [N \cdot mm]$$

dove:

- G_F = energia di frattura (N/mm)
- W_0 = area sottesa alla curva F-CMOD fino al punto di rottura del

provino ($N \cdot mm$)

- W_1 = lavoro svolto dal peso del provino e dalla struttura di carico ($N \cdot mm$)

- A_{lig} = area della sezione senza considerare l'area di intaglio ($b \cdot h$) (mm^2)

- m_1 = massa del provino (kg)

- S = lunghezza cella di carico (mm)

- L = lunghezza del campione (mm)

- m_2 = massa della struttura non attaccata alla macchina ma posta sul provino fino a rottura (kg)

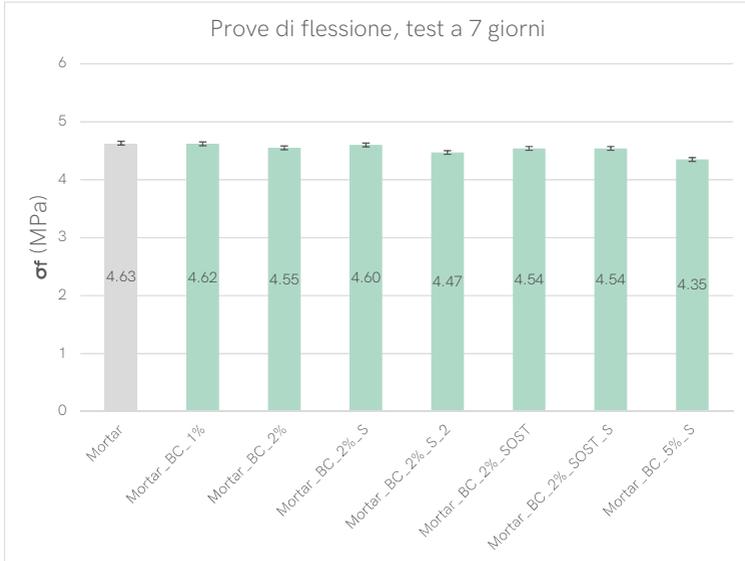
- g = accelerazione di gravità (9.81 m/s^2)

- $CMOD_c$ = $CMOD$ all'istante della rottura (mm)

Dai dati ricavati dalle prove di flessione a tre punti e dalle prove a compressione, si possono evidenziare interessanti cambiamenti dovuti all'aggiunta di micro/nano particelle di Biochar all'interno dei campioni sperimentali di malta cementizia.

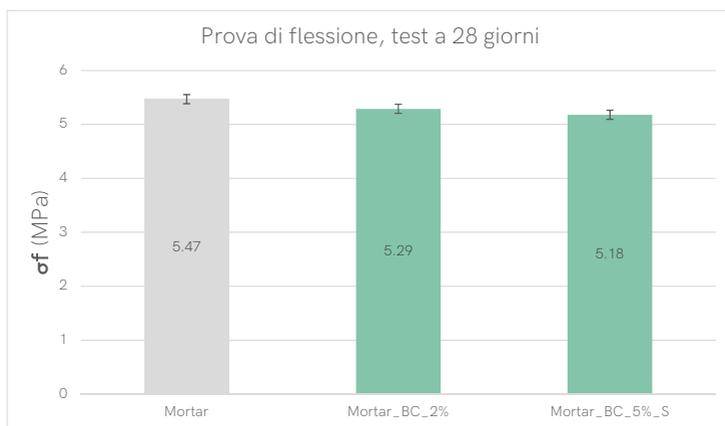
Nelle prove a flessione su tre punti i provini di malta con aggiunta di Biochar subiscono una leggera diminuzione in termini di resistenza, tra lo 0.4% e il 6%, rispetto al provino di malta privo di Biochar, sia a 7 che a 28 giorni di maturazione.

Il valore di resistenza a flessione (σ_f) calcolato sul provino di malta bianca, testato a 7 giorni, è pari a 4.63 MPa; come si legge dal grafico, all'aumentare della percentuale di Biochar si assiste alla diminuzione di σ_f anche se in percentuale molto bassa (es. 1% Biochar=4.62 MOR; 5% Biochar=4.35).



Resistenza a flessione a 7 giorni

I provini testati a 28 giorni presentano un σ_f ovviamente più alto, dato dal ciclo di maturazione del cemento, il quale dopo i 28 giorni ha raggiunto il massimo delle prestazioni meccaniche. La malta priva di Biochar ha un σ_f pari a 5.47 MPa e nei provini con Biochar si riscontra lo stesso comportamento di quelli testati a 7 giorni: σ_f diminuisce all'aumentare della percentuale di materiale aggiunto.



Resistenza a flessione a 28 giorni

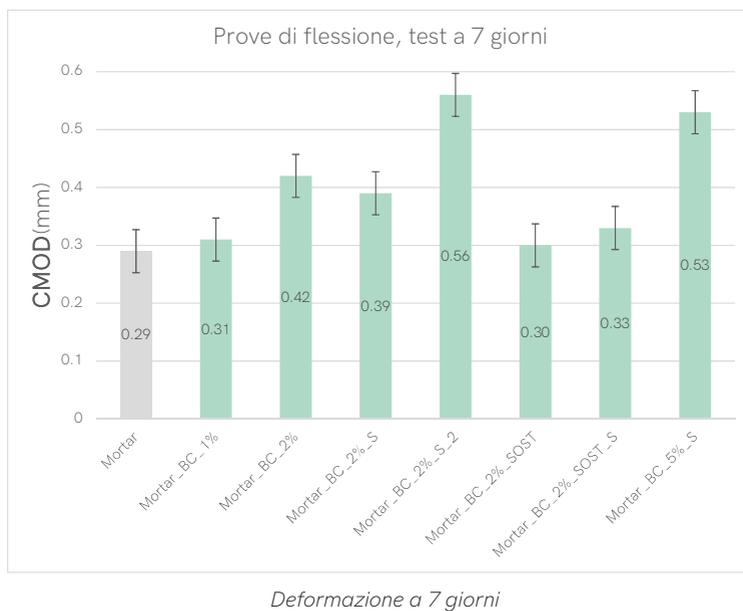
Tuttavia, se nell'ambito della resistenza meccanica l'aggiunta di Biochar non ha apportato significativi cambiamenti, in termini di deformazione si assiste ad un notevole miglioramento.

Nelle prove a flessione a 7 giorni, la presenza di micro-nano particelle di Biochar ha comportato un aumento della duttilità (ovvero della capacità di subire deformazioni plastiche prima della rottura in presenza di un carico) pari quasi al 100%; la malta bianca riporta un valore di deformazione pari a 0.29 mm contro i 0.56 mm ottenuti da un provino contenente il 2% di Biochar.

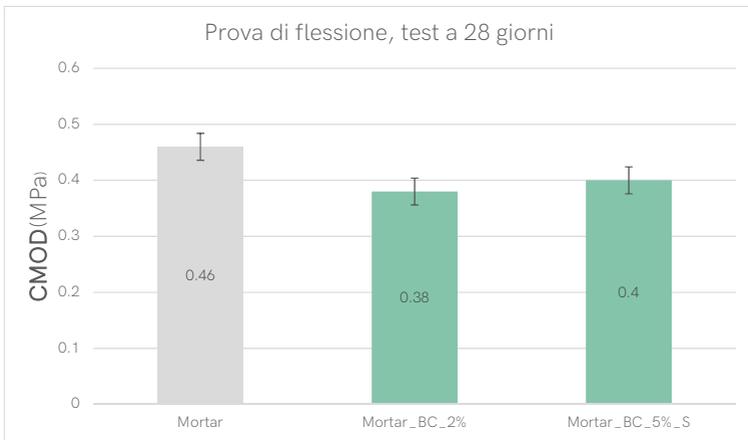
Durante la fase iniziale è stato verificato che la percentuale di aggiunta ottimale, in termini di forza e deformazione, è pari al 2% rispetto al peso del cemento e, per approfondire le conseguenze ottenibili da tale percentuale, si è ripetuto l'impasto utilizzando un'altra metodologia: il Biochar è stato addizionato all'impasto a secco, mischiandolo direttamente con il cemento. Con questa differenziazione si sono ottenuti due valori piuttosto distanti fra di loro ma di media migliore rispetto ai provini tradizionali con il 2% di Biochar, avvalorando così la tesi relativa alla percentuale ottimale.

Invece, un aumento estremo di percentuale (5%) ha comportato

sì, buoni risultati a livello di deformazione, ma non in modo proporzionale. Il valore ottenuto risulta comunque minore rispetto ad un'aggiunta del 2%.

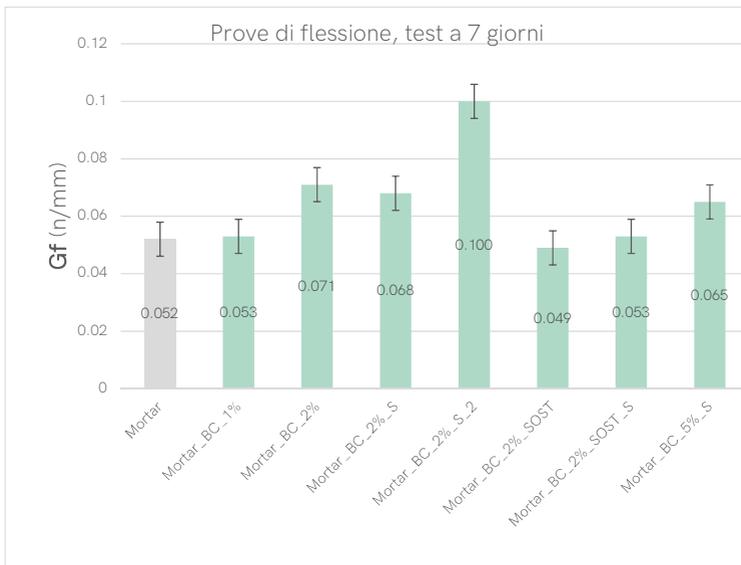


Nelle malte testate a 28 giorni, tuttavia, compare un'anomalia: nonostante i giorni di maturazione, le prestazioni di duttilità dei provini con aggiunta di Biochar pari al 2% e al 5% diminuiscono del 10-20%.



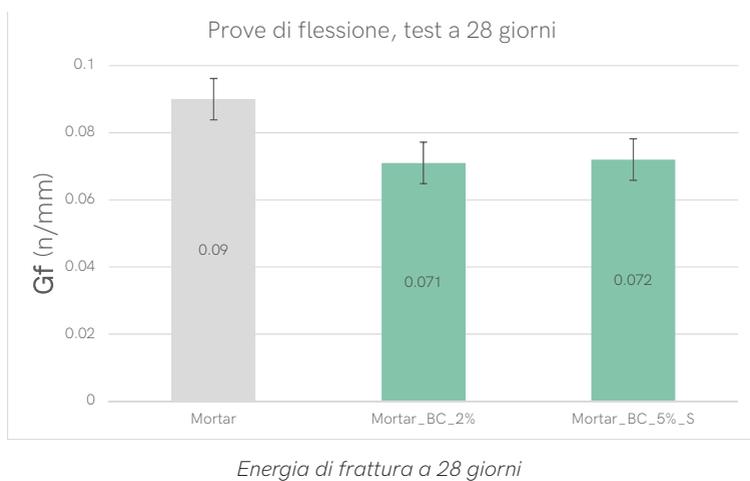
Deformazione a 28 giorni

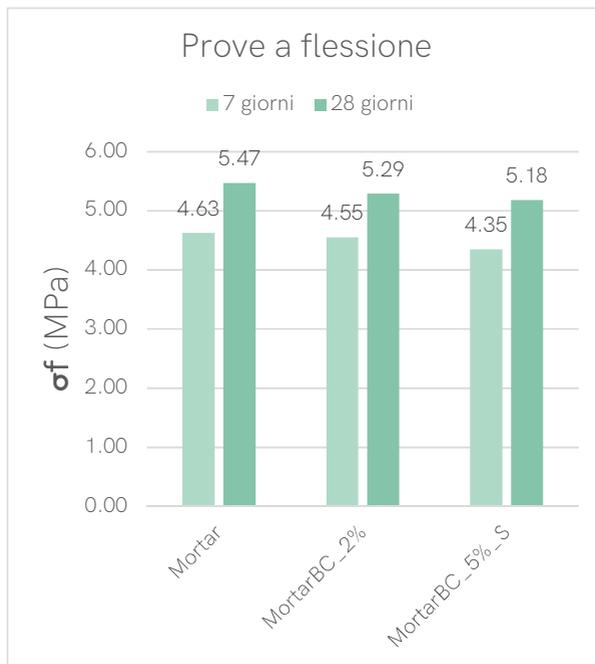
A partire dai dati ottenuti dalle prove di flessione è stata calcolata l'energia di frattura GF sia a 7 che a 28 giorni: dai grafici seguenti si legge che nei campioni contenenti Biochar essa aumenta leggermente, ma non in modo proporzionale alla percentuale di filler aggiunto. Nei campioni testati a 7 giorni, la malta bianca ha un'energia di frattura pari a 0.052 N/mm e raggiunge un valore massimo di 0.100 N/mm con l'aggiunta del 2% di Biochar; tuttavia, la stessa percentuale ha comportato risultati differenti tra loro, mantenendo però un valore sempre superiore alla malta bianca.



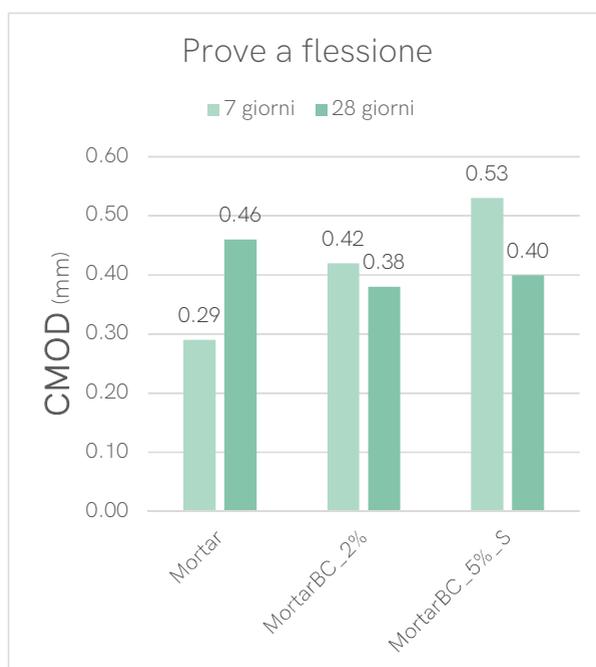
Energia di frattura a 7 giorni

Nei campioni testati a 28 giorni l'energia di frattura dei provini con Biochar non riporta un incremento significativo, in linea con i valori di forza e di deformazione precedentemente analizzati.

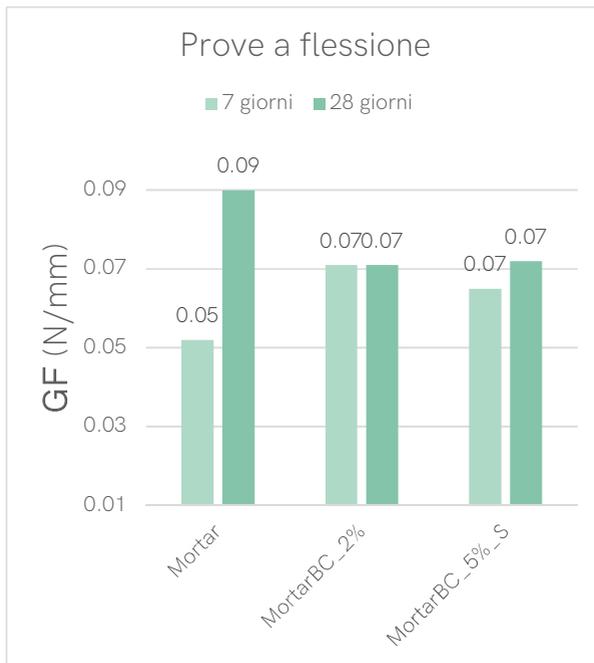




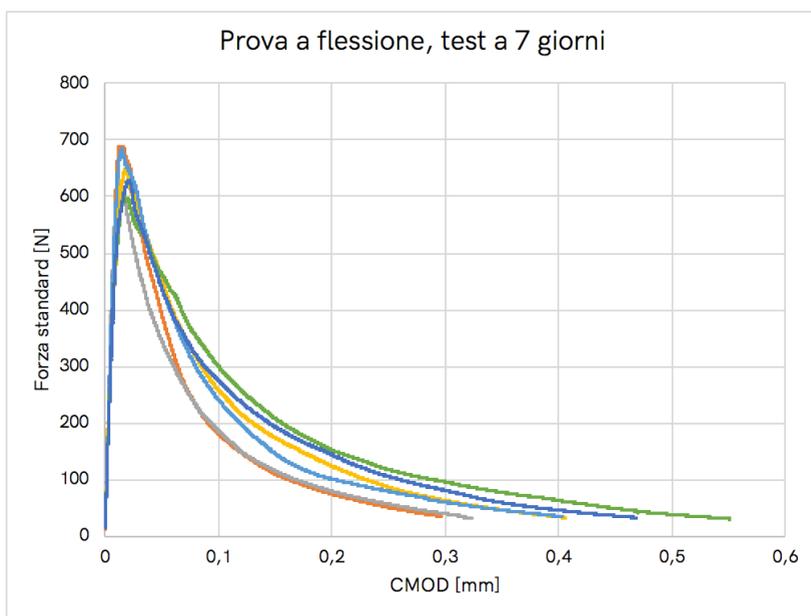
Comparazione tra i risultati ottenuti a 7 e 28 giorni



Comparazione tra i risultati ottenuti a 7 e 28 giorni

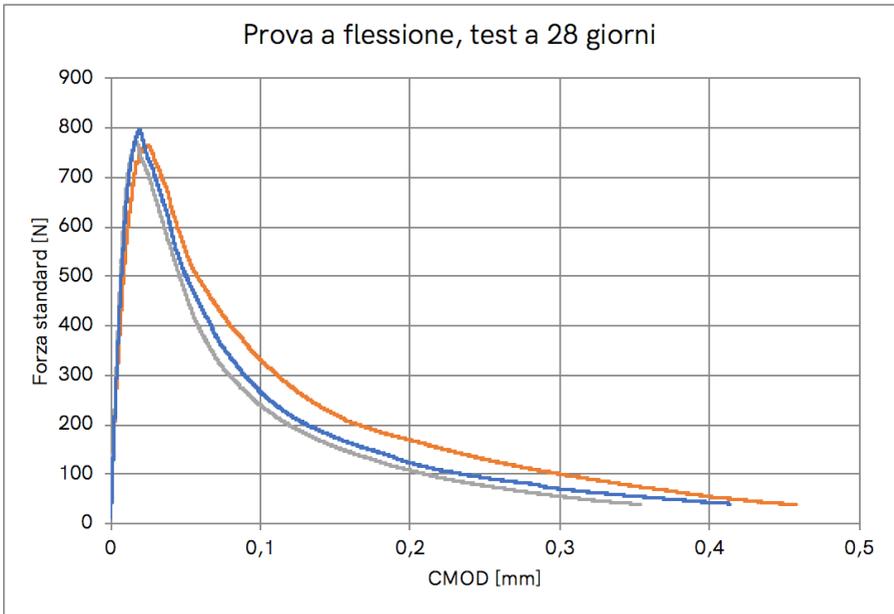


Comparazione tra i risultati ottenuti a 7 e 28 giorni



- no Biochar
- 1% Biochar
- 2% Biochar in acqua
- 2% Biochar a secco
- 2% Biochar a secco (2)
- 5% Biochar

Comparazione tra i risultati delle prove a flessione con diverse percentuali di Biochar



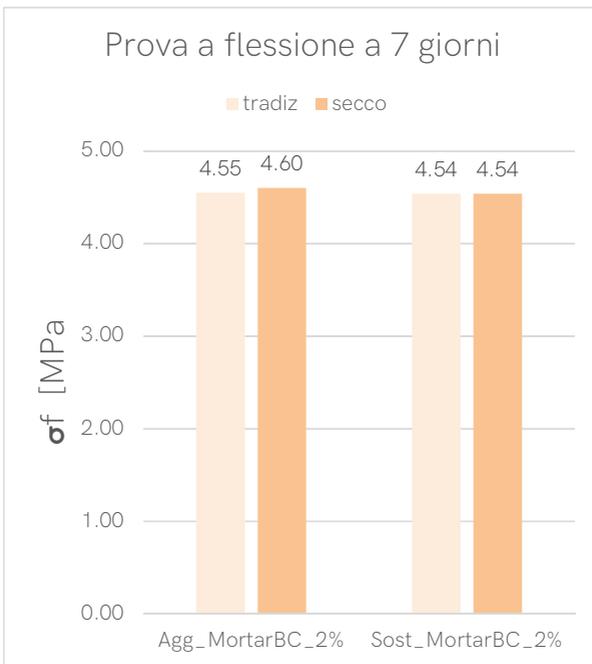
- no Biochar
- 2% Biochar
- 5% Biochar a secco

Comparazione tra i risultati delle prove a flessione con diverse percentuali di Biochar

Sulla linea di quanto verificato, si è proceduti ad una nuova tipologia di impasto, caratterizzata dalla sostituzione del 2% del cemento necessario, con il 2% di Biochar rispetto al peso del cemento originario. Questo stesso impasto è stato svolto in modo tradizionale, addizionando il Biochar all'acqua, e a secco, mischiandolo direttamente nel cemento.

Le prove a flessione hanno mostrato dei risultati molto interessanti: le prestazioni ottenute non sono molto lontane dai provini realizzati con l'aggiunta del 2% di Biochar, in particolare per quel che riguarda la resistenza (Tab.1).

I provini realizzati con l'aggiunta di Biochar riportano un σ_f medio di 4.55 MPa mentre i secondi realizzati con la sostituzione del cemento hanno un σ_f medio pari a 4.54 MPa.



Modulo di rottura (MOR) prove a flessione con 2% di Biochar

Rispetto alla deformazione, si ha uno scarto maggiore tra l'aggiunta e la sostituzione di Biochar. I primi provini riportano un valore di 0.42 mm, mentre i secondi di 0.30 (entrambi realizzati con metodo tradizionale); al contrario, con la metodologia di miscelazione di Biochar a secco, lo scarto tra aggiunta e sostituzione di Biochar diminuisce (rispettivamente 0.39 mm e 0.33 mm).



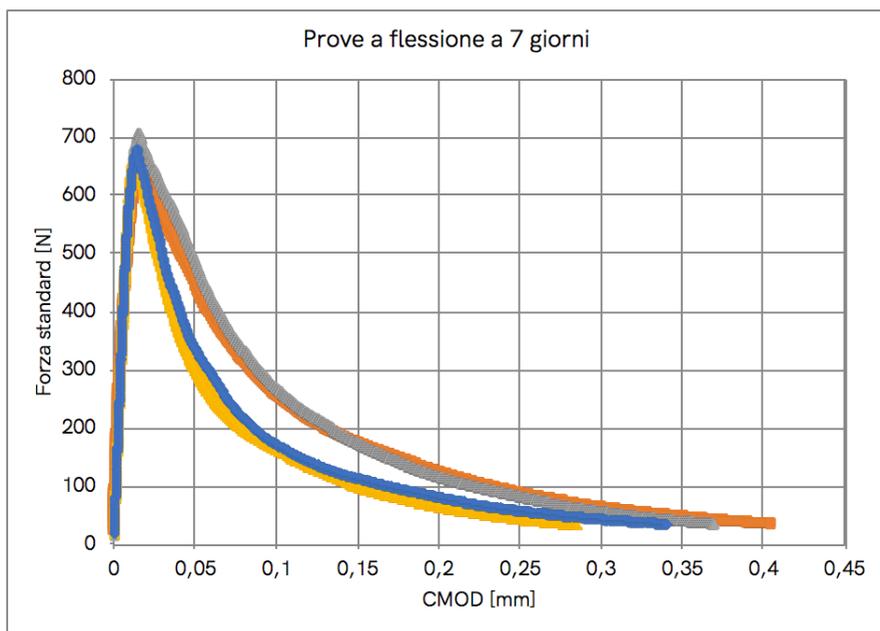
Deformazione prove a flessione con 2% di Biochar

A partire dai dati precedenti, è stata calcolata l'energia di frattura dei campioni, utile a comprendere il comportamento dei suddetti in presenza di una forza.

Come anticipato, la sostituzione di una percentuale di cemento con Biochar non ha comportato particolari benefici in termini di resistenza meccanica e deformazione, ma, allo stesso tempo, non si assiste ad un peggioramento drastico.



Energia di frattura prove a flessione con 2% di Biochar



- aggiunta Biochar - metodo tradizionale
- aggiunta Biochar - metodo a secco
- sostituzione Biochar - metodo tradizionale
- sostituzione Biochar - metodo a secco

Comparazione tra i risultati delle prove a flessione con diverse percentuali di Biochar

Risultati delle prove a compressione

Le prove a compressione sono state effettuate su tre serie di provini di malta che sono stati fatti maturare per 28 giorni, periodo entro cui il cemento raggiunge il massimo delle sue prestazioni meccaniche. La prova è stata eseguita sulle due metà prismatiche, generate dalla rottura del provino durante la prova a flessione, aventi sezione di 40x40 mm. Come ci si aspettava, i valori ottenuti con le prove a compressione non mostrano particolari incrementi e risultano in linea con quanto ottenuto dalle prove a flessione.

La diversa percentuale di aggiunta di Biochar nei singoli impasti non comporta miglioramento o peggioramenti significativi in modo proporzionale.

In generale, il comportamento dei provini è pressoché simile, se non per lievi differenze tra miscelazione Biochar in acqua e a secco; nel primo caso, in seguito al crollo, il campione presenta un andamento in termini di forza piuttosto lineare, mentre nel secondo risulta oscillare maggiormente, probabilmente a causa di una miscelazione non perfettamente omogenea.

Tuttavia, i valori ottenuti risultano meno performanti rispetto alla malta priva di Biochar.

Analisi FE-SEM

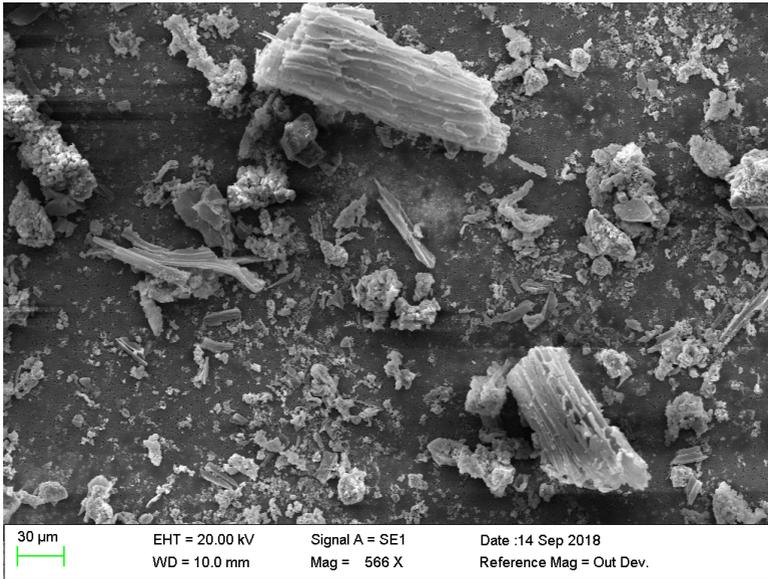
Una volta completate le prove di flessione e compressione, è stata condotta un'analisi

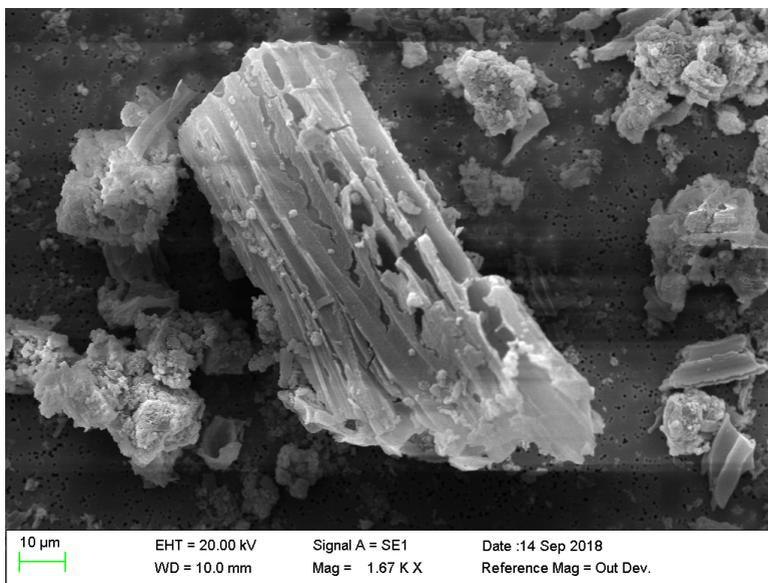
FE-SEM del Biochar di partenza e delle malte realizzate con aggiunta pari al 2%, sia con metodo tradizionale che con aggiunta a secco.

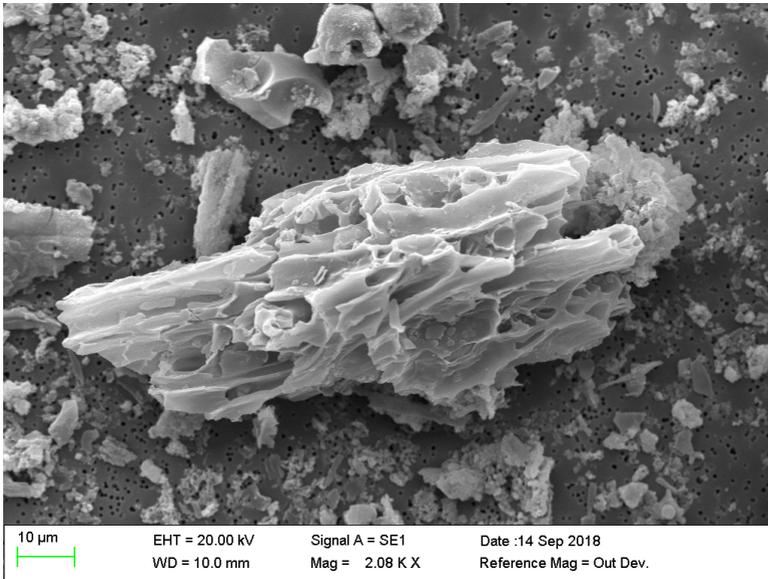
Questo tipo di analisi, effettuato con un microscopio elettronico a scansione ad emissione di campo, consente di eseguire l'analisi morfologica di campioni di piccole e grosse dimensioni.

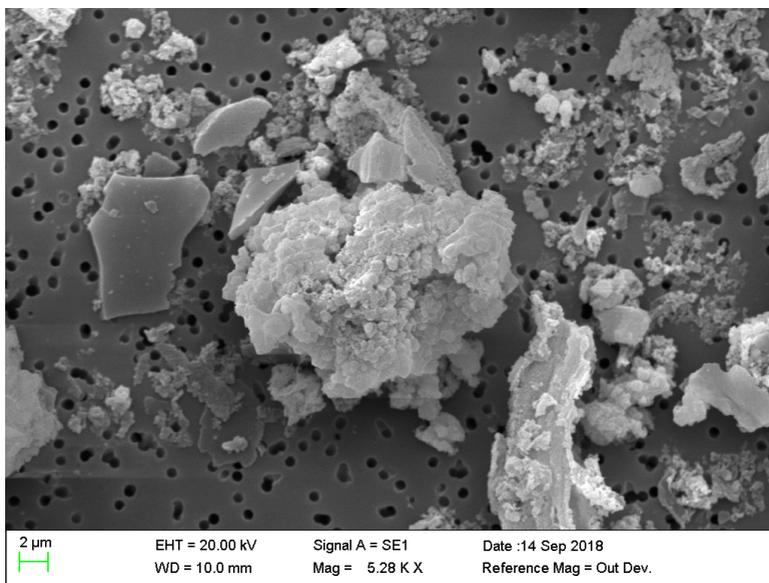
Le foto ottenute dall'analisi sono le seguenti:

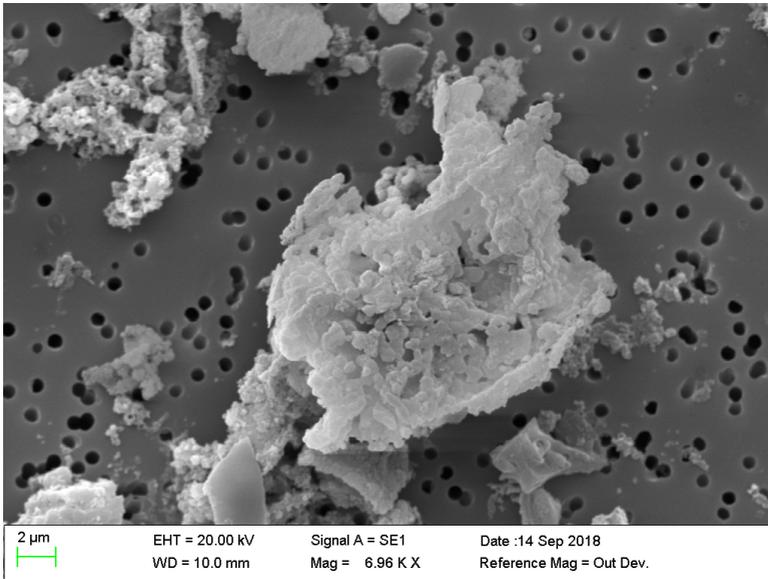
- Biochar



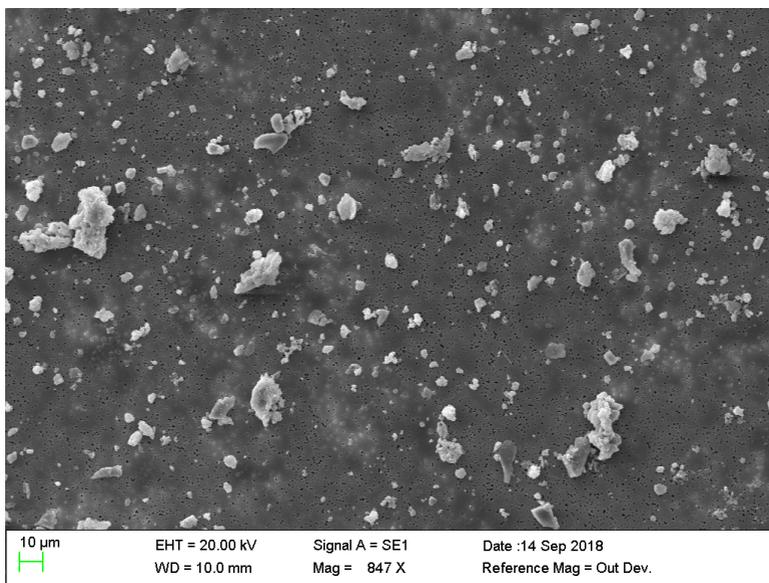


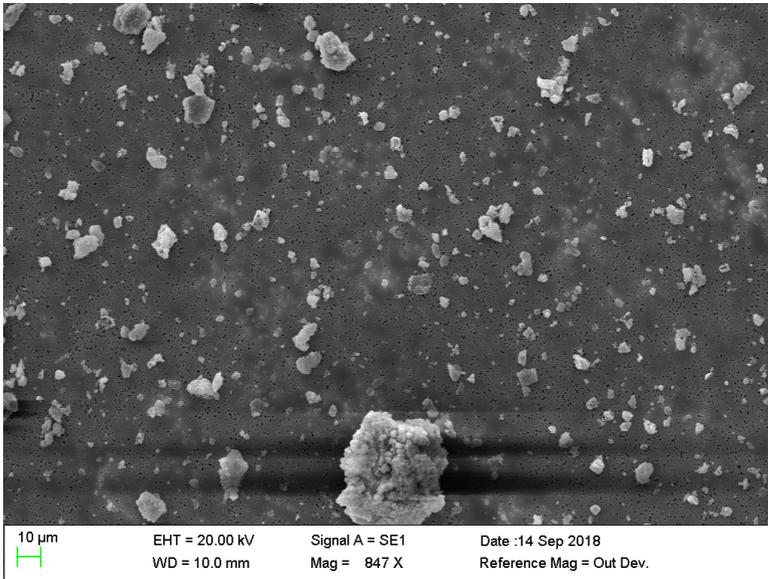




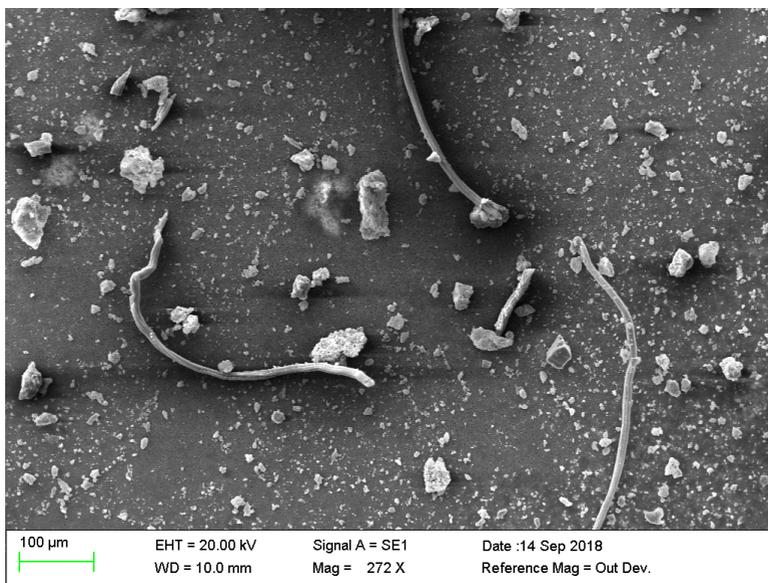


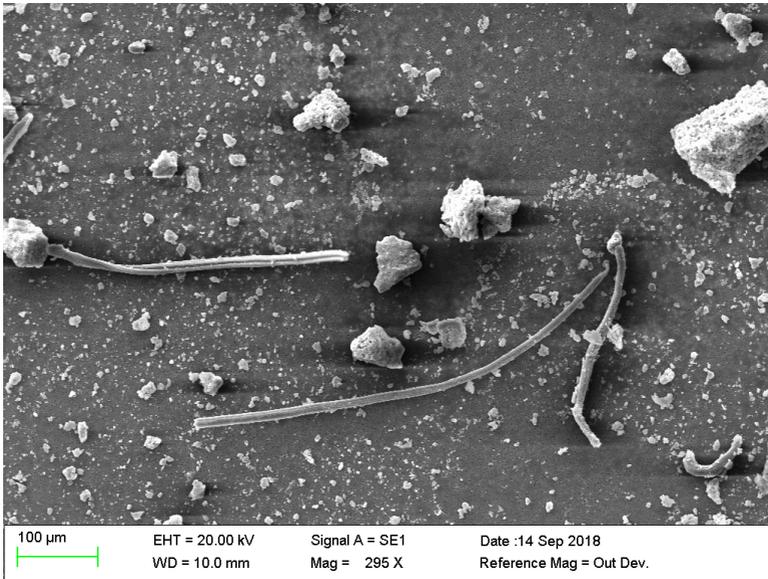
- Malta 2% Biochar - metodo tradizionale

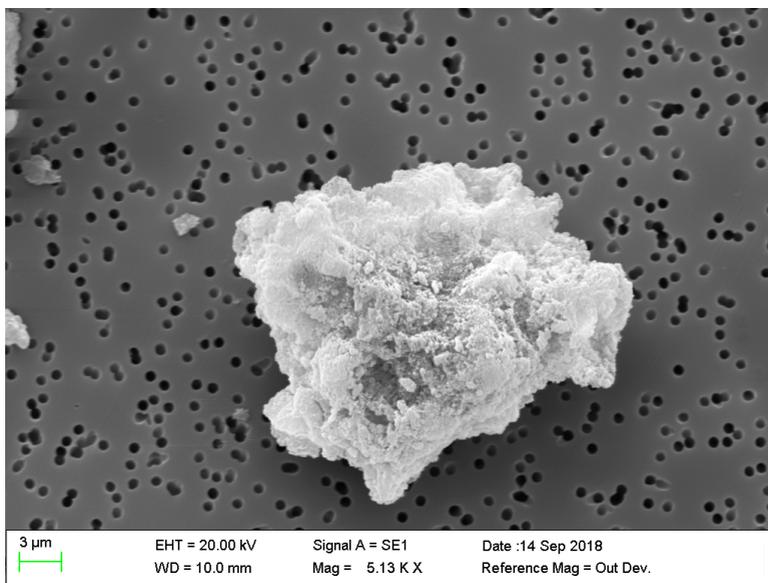


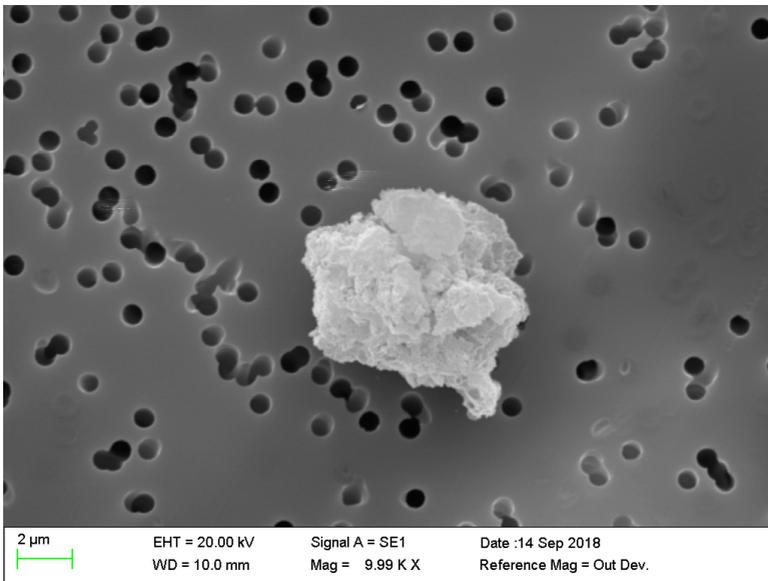


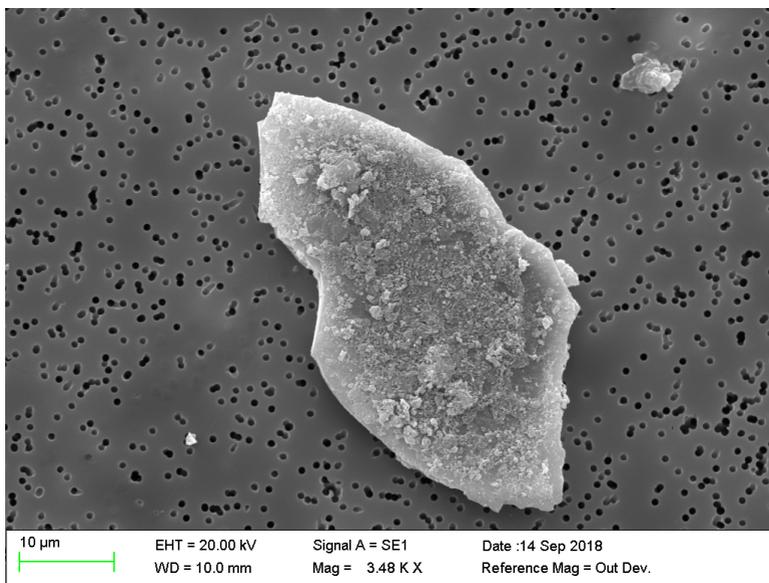
- Malta 2% Biochar - metodo a secco

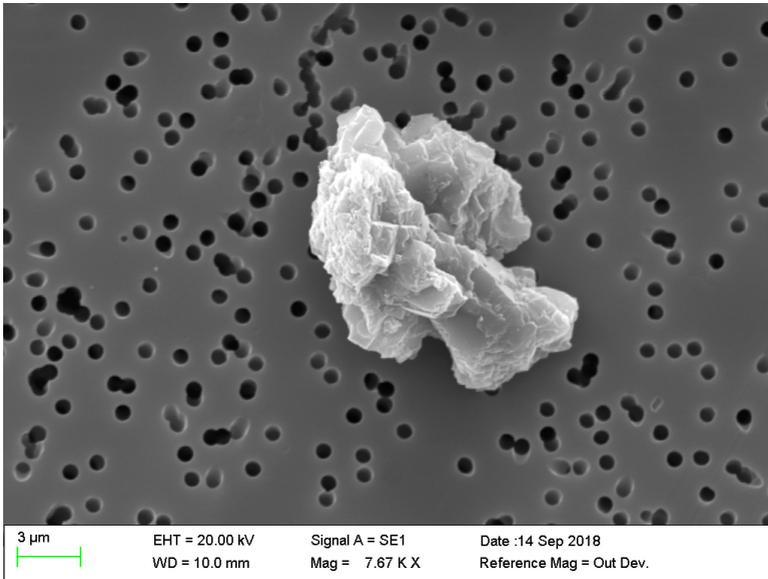












Da quest'analisi è possibile individuare la presenza di particolato organico, tipico del Biochar derivante da combustione di biomassa di origine organica, ma anche la presenza di composti di natura inorganica di origine non identificata (presenza di CSH).

Lo spettro EDS relativo all'analisi del Biochar riporta una grande quantità di carbonio all'interno dei composti organici (Fig.1), oltre ad altri elementi quali calcio, potassio e silicio, presenti soprattutto in calcestruzzi ad alta resistenza e ad alta durabilità. Questi elementi fanno riferimento ai materiali di natura inorganica identificati (Fig.2), che probabilmente derivano da sali che si sono creati durante la fase di cottura.

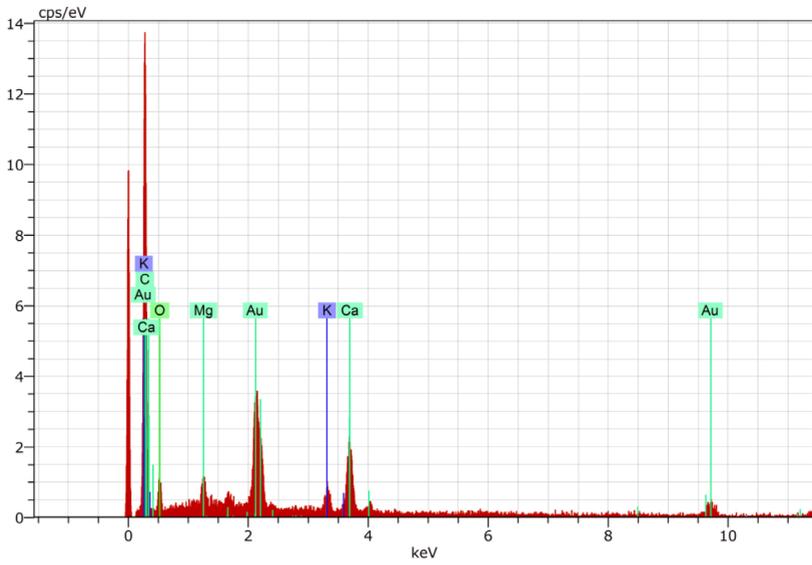


Fig.1

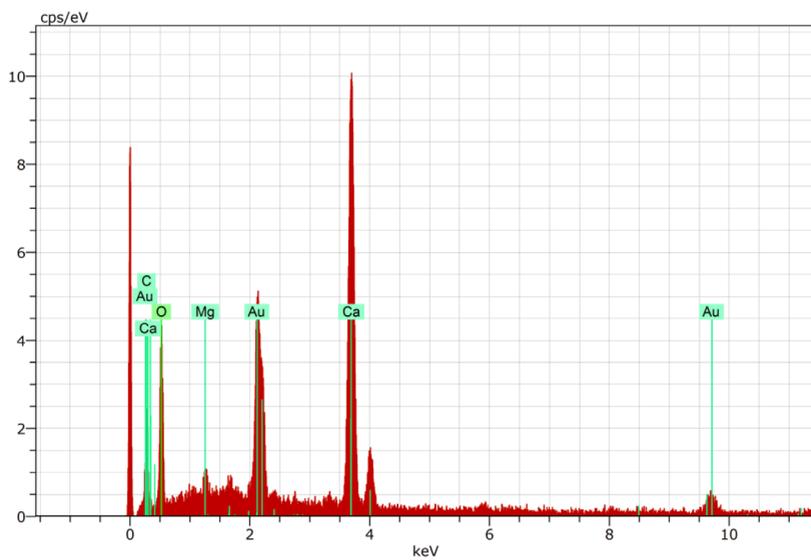


Fig.2

5

**Life Cycle
Assessment
& Life Cycle
Cost**

Introduzione

Negli ultimi anni sono stati fatti enormi passi in avanti verso tecniche e soluzioni progettuali ritenute “**ambientalmente responsabili**” e sono stati sviluppati altrettanti sistemi e strumenti di valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici, finalizzati ad una progettazione sana e poco impattante sulla nostra Terra.

Il dibattito sul progetto di architettura ha avuto larga diffusione, prendendo anche il sopravvento su altri temi legati alla questione ambientale, ed è proprio in questo settore che sono state fatte diverse riflessioni da un punto di vista teorico e sperimentazioni nell’operatività, diventando argomento centrale nell’ambito della sostenibilità e condizionando in modo sempre più rilevante le scelte da operare durante la progettazione, a partire dalla scala urbana e territoriale, fino ad arrivare alla scala di dettaglio di materiali e elementi costruttivi.

Diventa così fondamentale un’attenzione nei confronti di tutte le fasi della progettazione architettonica, basata sulla capacità di “*costituire scenari di trasformazione credibili e concretamente compatibili con l’ambiente. Per fare questo occorre una comprensione ampia del progettare e del costruire, intesi come attività sistemiche e interrelate all’interno delle quali produzione,*

uso e dismissione costituiscono aspetti inscindibilmente connessi”.

Per valutare tutti questi aspetti, risulta quindi necessario uno strumento, un approccio in grado di fornire quante più informazioni possibili che possano andare incontro all’ambiente e riuscire al contempo a soddisfare le necessità dell’uomo.

Ed è proprio in questo contesto che si inserisce il **Life Cycle Assessment**, un metodo di indagine che prevede l’analisi del ciclo di vita della materia e dei prodotti, i flussi energetici di ingresso e uscita, la caratterizzazione rispetto agli indicatori e la contestualizzazione nell’ambiente di progetto. Ma per una migliore valutazione del progetto sostenibile, un altro strumento fornisce dettagli che guidano le scelte del progettista: il **Life Cycle Cost** (o **Life Cycle Costing**). Si tratta di uno strumento finalizzato alla determinazione del costo complessivo di un edificio, componente o materiale seconda della durata di vita prevista. A differenza dell’LCA, che compie una valutazione di impatto ambientale, LCC si focalizza sull’aspetto economico, valutando l’impatto che un edificio ha in termini di costo durante il suo intero ciclo di vita, tenendo conto non solo dell’investimento iniziale ma anche degli eventuali costi di manutenzione, legati ad avvenimenti futuri, e dei

costi di fine vita relativi ad attività di demolizione e smaltimento. Entrambi sono strumenti che consentono al progettista (ma anche all'acquirente) di fare scelte consapevoli, rispettose dell'ambiente e che apportino un risparmio sia in termini economici che in termini di ambientali.

LCA: criteri e valutazioni

L'**analisi del ciclo di vita** è uno strumento utilizzato per verificare i requisiti e le prestazioni di un edificio, manufatto o materiale in ognuna delle sue fasi di vita. Grazie ad un punteggio, determinato su una scala predefinita, è possibile collocare il componente analizzato in un contesto tale da poter consentire una scelta sostenibile.

Il ciclo di vita di un componente è caratterizzato da una serie di **input**, che fanno riferimento al "punto di partenza", quali materie prime, energia, acqua e suolo, che alla fine del ciclo si traducono in **output**, quali emissioni in acqua, aria e suolo e produzione di rifiuti. Per ognuna delle fasi di vita vengono, quindi, determinati:

- I bilanci di energia e di materie prime;
- Le emissioni nocive in acqua, aria e suolo;
- La quantità di rifiuti prodotti;
- Le possibilità di riuso o riciclaggio degli elementi di scarto e/o le condizioni di smaltimento dei rifiuti;

facendo riferimento alla normativa internazionale per l'esecuzione di analisi LCA "*UNI EN ISO 14040 (2006) Gestione ambientale, Valutazione del ciclo di vita, Principi e quadro di riferimento*".

La normativa divide la struttura di un'analisi LCA in quattro fasi:

1. *Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione (Goal and scope definition)*: durante questa fase preliminare vengono definite le finalità dell'analisi, l'unità funzionale (quantità di materiale), i confini del sistema studiato, il fabbisogno di dati, assunzioni e limiti;

2. *Analisi di inventario (LCI Life Cycle Inventory)*: è la prima vera e propria parte di un'analisi LCA. In questa fase l'obiettivo è fare un quadro delle fasi del processo produttivo, dalla trasformazione al trasporto; viene, quindi, definito un modello analogo al caso analizzato e si raccolgono i dati relativi a quantità di energia, materia prima e emissioni riferiti alle fasi individuate, per quantificare i flussi di entrata e di uscita riferiti all'unità funzionale;

3. *Analisi degli impatti (LCIA Life Cycle Impact Assessment)*: questa fase ha lo scopo di valutare l'effettivo impatto ambientale generato dal processo, a partire dai risultati della precedente analisi di inventario; in tal modo viene evidenziato l'effetto del consumo di risorse e dei rilasci nell'ambiente. Qui avviene il passaggio da un'analisi di tipo oggettivo ad un giudizio di compatibilità ambientale basato principalmente su elementi soggetti a variazioni nel tempo.

4. *Interpretazione e miglioramento (Life Cycle Improvement)*: è la fase finale dell'analisi LCA, in cui vengono valutati i risultati ottenuti nelle fasi precedenti con lo scopo di trarre conclusioni, individuare gli aspetti critici e proporre eventuali cambiamenti per soddisfare i requisiti richiesti dagli obiettivi stabiliti nella prima fase.

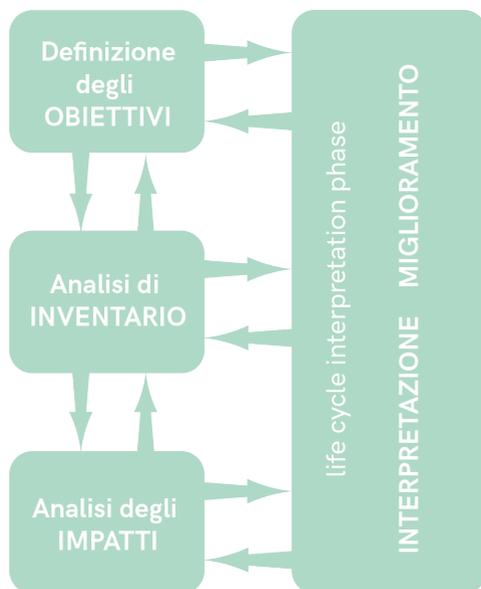


Fig.5.1 Struttura del LCA

L'analisi LCA rappresenta uno strumento importante poiché fornisce un quadro globale e dettagliato dell'oggetto in esame. Il documento tecnico-informativo che viene elaborato è di grande supporto all'utente e ai progettisti perché li guida nelle attività di intervento su processi, prodotti e attività, fornendo informazioni ambientali quantificate e armonizzate. Quando si parla degli obiettivi da raggiungere, generalmente si intendono:

- La **riduzione del consumo di risorse** mediante l'impiego di materiali di riciclo, lo sviluppo di prodotto durevoli o di breve durata ma riciclabili;
- La **riduzione delle emissioni** nelle fasi produttiva, di riciclo e di smaltimento;
- La **riduzione del carico ambientale degli scarti** tramite la definizione di tecnologie disassemblabili e il miglioramento della qualità dello smaltimento.

Per effettuare questa tipologia di analisi sono stati sviluppati diversi software grazie ai quali è possibile selezionare i materiali a seconda dell'impatto ambientale ma anche basandosi sull'aspetto economico, come ad esempio BEES che fa una valutazione eco-sostenibile e di tipo economico.

Esso tiene conto del costo iniziale, della manutenzione, della riparazione ed eventualmente dello smontaggio finale di un prodotto (ciclo di vita dalla culla alla tomba) valutandone l'eco compatibilità e la sostenibilità economica.

Analisi del ciclo di vita del bio-char

Al fine di valutare l'impatto ambientale generato dal bio-char è stato effettuato un confronto diretto tra la produzione di cemento e quella di bio-char basato su tre parametri principali: il **consumo di energia**, il **GWP²** e la **quantità di rifiuti** prodotti.

Il processo produttivo di una tonnellata di cemento prevede un consumo di energia totale pari a 6.296 MJ; il GWP è pari 784 kg di CO₂ equivalente mentre la quantità di rifiuti prodotti ammonta a 0.29 kg (di cui 0.09 kg riutilizzabili e 0.1 kg riciclabili).

Il bio-char, invece, in quanto sottoprodotto solido di un processo di combustione di biomassa, non ha impatto in termini di consumo di energia; tuttavia, ai fini di una valutazione si può considerare il quantitativo di energia (necessario a produrre una tonnellata di bio-char) utilizzato durante i processi di pirolisi o gassificazione pari a 3888 MJ. Il valore del GWP, di conseguenza, sarà un valore negativo e infatti esso oscilla tra -0.2 e -1.3 kg di CO₂ equivalente. Allo stesso modo, non è prevista alcuna produzione di rifiuti, essendo il bio-char un rifiuto stesso.

Tali numeri evidenziano un bilancio estremamente a favore del bio-char, che con le sue caratteristiche può migliorare le prestazioni del cemento senza avere impatti negativi sull'ambiente.

LCC: criteri e valutazioni

Con la sigla LCC si intende la metodologia del Life Cycle Costing, sinonimo di Total Life Cost o Global Cost, utilizzata per la **valutazione degli impatti economici** di edifici, componenti e materiali. È definita dalla normativa ISO 15686-5 del 2008 e può essere applicata sia su di un bene di nuova costruzione che su di un bene esistente.

È una valutazione basata su aspetti non solo economici, ma anche tecnologici e trova importante applicazione nella comparazione di soluzioni tecnologiche alternative.

L'obiettivo del metodo è quindi la comparazione di diversi elementi con un focus sulle differenze tecnologiche, le quali consentono la valutazione e la quantificazione dei carichi energetici e ambientali, ad esse connesse, e i potenziali impatti basati sui concetti di *vita utile e flessibilità*.

Questa metodologia permette di partire da un caso base del progetto in questione e fare diverse ipotesi alternative rispetto ai sistemi valutandone costi, consumi e performance energetiche. Essendo applicata all'intero ciclo di vita, il Life Cycle Costing serve al monitoraggio dei costi e benefici durante tutte le fasi, sia immediati che a lungo termine, a partire dalla fase zero a quelle

di costruzione fino ad arrivare alle fasi di riciclo e smaltimento. A seconda dei costi calcolati, il LCC fornisce un indice di efficienza economica, utile, insieme ad altri indicatori ambientali, ad avere l'*indice di performance economica* globale dell'edificio.

Prima di procedere con le scelte è di fondamentale importanza definire:

- La "*durata economica*" e la "*durata effettiva*" di un edificio, componente o materiale edilizio, dove la prima consiste in un periodo di tempo al di là del quale non è più conveniente il mantenimento ma la sostituzione, mentre la seconda rappresenta il periodo di tempo che intercorre tra la costruzione e la demolizione o il ripristino;

- il "*periodo di valutazione*" ossia il periodo di **funzionamento** previsto dall'edificio, componente o materiale. "*Questo parametro è condizionato da diverse tipologie di obsolescenze: **fisica**, stabilita in riferimento al momento di collasso fisico, **funzionale**, stabilita in riferimento al momento in cui si prevede cesserà la funzione originaria del bene, **economica**, stabilita in riferimento al momento in cui terminerà il vantaggio economico del mantenimento in essere dell'edificio/componente; **tecnologica**, stabilita in riferimento ai*

*progressi tecnologici che ne rendono necessaria la sostituzione, **sociale**, stabilita in riferimento ai mutamenti dei bisogni degli individui ed alle domande di sostituzione, **legale**, in riferimento a leggi che ne impongono la sostituzione.^{3''}*

Così come il LCA, anche il LCC prevede un iter caratterizzato da una serie definita di passaggi necessari a stabilire gli obiettivi, effettuare le analisi e interpretare i risultati:

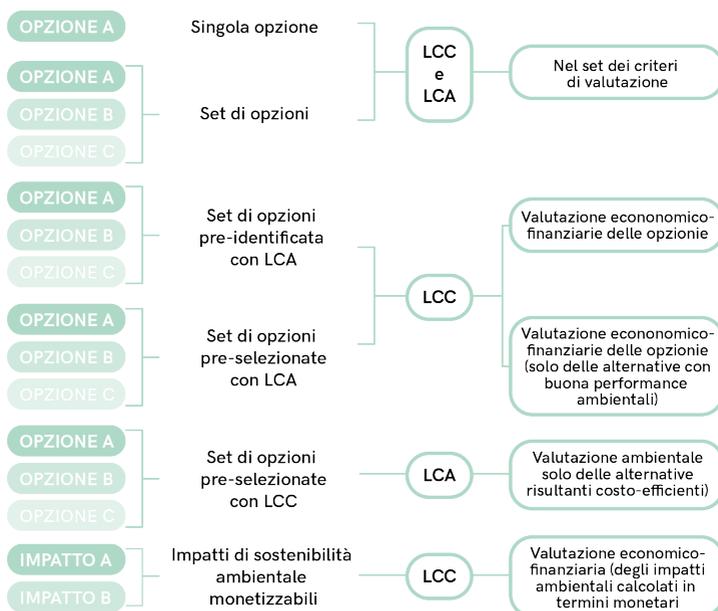
- *Step 1*: identificazione dello scopo principale dell'analisi LCC;
- *Step 2*: identificazione dello scopo iniziale dell'analisi;
- *Step 3*: identificazione delle relazioni fra analisi di sostenibilità e LCC;
- *Step 4*: identificazione del periodo di analisi e dei metodi di valutazione economica;
- *Step 5*: identificazione delle necessità di analisi aggiuntive, quali analisi di rischio/incertezza e sensibilità;
- *Step 6*: identificazione dei requisiti del bene e del progetto;
- *Step 7*: identificazione delle opzioni che devono essere incluse nell'analisi LCC e delle voci di costo da considerare;
- *Step 8*: raccolta di dati di costo e tempo da usare nell'analisi LCC;

- *Step 9*: verifica dei valori dei parametri finanziari e del periodo di analisi;
- *Step 10*: revisione della strategia di rischio e produzione di un'analisi preliminare di rischio/incertezza;
- *Step 11*: produzione della valutazione economica;
- *Step 12*: applicazione dell'analisi di rischio/incertezza dettagliata, se necessaria;
- *Step 13*: applicazione dell'analisi di sensitività, se necessaria;
- *Step 14*: interpretazione e presentazione dei risultati iniziali;
- *Step 15*: presentazione dei risultati e predisposizione della reportistica finale.

Il criterio ideale per definire l'ampiezza del LCC è quello di calibrare tutto sulla base del tipo di manufatto e del tipo di tecnologie inserite; la durata nel dettaglio viene poi definita per convenzione sulla base della vita utile più breve di un elemento significativo all'interno del costo stratigrafato.

Come anticipato, le metodologie di Life Cycle Assessment e Life Cycle Costing possono interagire tra di loro: la valutazione può essere effettuata in modo congiunto, valutando il progetto nell'insieme, oppure possono essere sviluppati due modelli

differenti, dove l'uno rappresenta l'input dell'altro (nello specifico è più indicato effettuare prima un'analisi LCA e poi applicare l'analisi LCC sugli elementi selezionati).



Sinergie fra LCA e LCC

Analisi dei costi del bio-char

Per la valutazione dei costi relativi alla produzione delle malte a base cementizia con aggiunta di bio-char sono stati presi in considerazione i costi dei singoli materiali costituenti la malta stessa:

- cemento 0.2 €/kg;
- acqua 1.44 €/kg;
- sabbia 0.06 €/kg;
- biochar 0.02 €/kg.

Successivamente, sono stati calcolati i kg necessari di ogni materiale per la produzione di 1 m³ di malta, relativo ad ogni tipologia di malta realizzata durante la fase di sperimentazione. I valori ottenuti sono mostrati nella seguenti tabelle (Tab.5.1, Tab.5.2):

Mortar mix	Description
MORTAR	Plain cement paste
MORTAR_BC1%	Mortar with 1% biochar in water
MORTAR_BC2%_T	Mortar with 2% biochar in water
MORTAR_BC2%_S	Mortar with 2% biochar in cement
MORTAR_BC2%_S	Mortar with 2% biochar in cement
MORTAR_BC2%_SOST_T	Mortar with 2% biochar replaced with cement (mixture in water)
MORTAR_BC2%_SOST_S	Mortar with 2% biochar replaced with cement (mixture cement)
MORTAR_BC5%_S	Mortar with 2% biochar in cement

Tab.5.1 Descrizione dei provini

Cement [Kg]	Cement cost €	Water [Kg]	Water cost €	Sand [kg]	Sand cost [€]	Biochar [Kg]	Biochar cost €	Total €/m ³	€ comp. MORTAR
585,9	117,2	292,97	421,9	1757,82	105,47	-	-	644,5	
585,9	117,2	292,97	421,9	1757,82	105,47	5,86	0,12	644,7	0,12
585,9	117,2	292,97	421,9	1757,82	105,47	11,72	0,23	644,8	0,23
585,9	117,2	292,97	421,9	1757,82	105,47	11,72	0,23	644,8	0,23
585,9	117,2	292,97	421,9	1757,82	105,47	11,72	0,23	644,8	0,23
574,2	114,8	292,97	421,9	1757,82	105,47	11,48	0,23	642,4	-2,11
574,2	114,8	292,97	421,9	1757,82	105,47	11,48	0,23	642,4	-2,11
585,9	117,2	292,97	421,9	1757,82	105,47	29,30	0,59	645,1	0,59

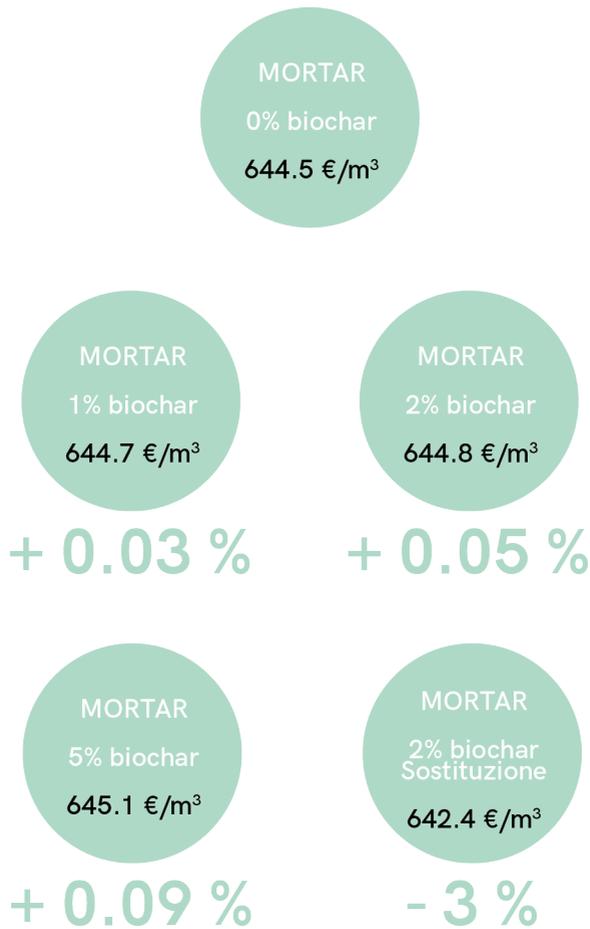
Tab.5.2 Analisi dei costi

Nella valutazione dei costi sono stati messi a confronti i costi delle malte contenenti bio-char con il costo della malta priva di aggiunta.

Da questa analisi è evidente quanto l'impatto economico del bio-char sia minimo, essendo un materiale di scarto che non richiede, quindi, alcun dispendio di energia o di materiale in più.

Questo materiale rientra perfettamente nei parametri della sostenibilità economica e ambientale, essendo il costo aggiuntivo irrisorio, nelle malte con aggiunta di bio-char, e addirittura minore, nelle malte con sostituzione, e non producendo emissioni di inquinanti atmosferici. Inoltre, esso contribuisce al miglioramento della prestazioni meccaniche, andando incontro alle esigenze delle nuove tecnologie.

Pertanto, il bilancio in termini di produzione risulta essere positivo e a favore dell'uso del bio-char.



Note bibliografiche

¹ Andrea Campioli, Prefazione "Life Cycle Design in Architettura", Carol Monticelli, Maggioli Editore (2013)

² Il GWP o "Global Warming Potential" è un valore che esprime contributo di un gas serra alla generazione dell'effetto serra. In particolare, tale valore è relativo all'effetto generato dalla CO₂, il cui potenziale di riferimento è pari a 1.

³ "Valutazione sostenibilità progetto, Life cycle thinking e indirizzi internazionali", Elena Fregonara, Franco Angeli Edizioni (2015)

Conclusioni

L'architettura contemporanea è sempre più orientata verso la realizzazione di edifici ad alte prestazioni, in grado di soddisfare esigenze, requisiti e prestazioni osservati all'interno del sistema edilizio, fornendo inoltre una risposta alle crescenti problematiche ambientali.

Uno dei campi di ricerca più interessanti al giorno d'oggi è quello legato alla produzione di materiali da costruzione innovativi che, presentando le medesime prestazioni di quelli tradizionali, risultano più efficienti e, soprattutto, sostenibili.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di sperimentare un nuovo materiale - il **Biochar** - come valida alternativa al **cemento**, materiale di grande rilievo e diffusione sulla scena mondiale delle costruzioni.

In maniera più specifica, la sperimentazione di tesi si è focalizzata sulla concezione di un nuovo materiale cementizio, ottenuto miscelando il Biochar al cemento. Per soddisfare le necessità di sicurezza strutturale dei materiali innovativi, si è posta l'attenzione sulle proprietà meccaniche (resistenza a flessione ed a compressione) dei nuovi compositi. Inoltre, sono state valutate anche la duttilità (in termini di studio dell'energia di frattura

tramite prove di flessione a tre punti, parametro di fondamentale importanza poiché fornisce informazioni relative alla quantità di energia assorbita dal provino sottoposto ad una forza fino al momento della sua rottura in due parti) e la durabilità.

Analizzando i risultati delle sperimentazioni precedentemente condotte presso il DISEG del Politecnico di Torino (Restuccia, 2016; Cosentino 2017), il lavoro di tesi è stato incentrato sulla ricerca del mix design ottimale (quantità di nano/micro particelle di Biochar; rapporto acqua/cemento; quantità di superfluidificante) col fine di ottenere malte a base cementizia altamente performanti.

Nello specifico, il lavoro si è incentrato sull'applicazione di differenti metodologie per il confezionamento dei provini (aggiunta e/o sostituzione di Biochar) e sulle procedure di impasto ottimali (tradizionale o a secco). Al termine dei test meccanici, è stata individuata una percentuale di aggiunta ottimale di Biochar (2%) che ha contribuito al miglioramento delle prestazioni in modo sostanziale, sia in termini di aggiunta come filler che di sostituzione del cemento.

Dai risultati ottenuti, l'aggiunta di bio-char ha apportato un significativo miglioramento in termini di "duttilità": la presenza

di micro/nano particelle di Biochar contribuisce al cambiamento della traiettoria del percorso della frattura principale ed alla formazione di molteplici fratture secondarie, che permettono una maggiore dissipazione di energia facendo incrementare in modo notevole la superficie di frattura.

L'aumento dell'energia di frattura non è, tuttavia, proporzionale alla quantità di bio-char aggiunto per ogni miscela, probabilmente per problemi legati alla corretta dispersione delle nano/micro particelle all'interno della matrice cementizia.

Analizzando invece i risultati relativi alla resistenza a flessione e compressione dei nuovi compositi, si registra un esiguo miglioramento delle proprietà meccaniche. Ciò può essere ricondotto al differente procedimento di ottenimento/combustione del Biochar.

Infatti, il materiale usato in questo lavoro di tesi è stato ricavato da un processo di gassificazione di scarti di potatura (temperature nel range dei 600-700°C) mentre nelle ricerche precedenti (Restuccia, 2016; Cosentino, 2017) era stato utilizzato materiale proveniente dalla pirolisi di scarti agroalimentari e/o arbusti (temperature nel range dei 700-900°C). In letteratura, è noto che i due differenti

processi di produzione influenzano notevolmente la qualità del Biochar, in termini di purezza, stabilità, quantitativo di carbonio presente, presenza di impurità.

In generale, i risultati ottenuti dimostrano che l'obiettivo della tesi è stato in parte raggiunto (incremento dell'energia di frattura) e che l'aggiunta del Biochar al cemento tradizionale permette di ottenere un nuovo composito più efficiente e sostenibile.

Inoltre, bisogna tenere presente che il Biochar è un materiale di scarto, in quanto rappresenta il sottoprodotto solido dei processi di combustione di biomassa per la produzione di energia. Pertanto, oltre a poter essere applicato ai materiali per l'architettura, contribuisce a ridurre gli impatti ambientali legati alla produzione di rifiuti e alle emissioni di sostanze inquinanti nell'atmosfera, rispondendo in modo positivo agli obiettivi posti durante la 16° Conferenza della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti climatici, in cui i governi concordarono sull'esigenza di ridurre le emissioni di gas serra dal 20% al 40% in direzione di un'architettura sostenibile.

Bibliografia & sitografia

- "Building for a Changing Culture and Climate - World Atlas of Sustainable Architecture", Ulrich Pfammatter, DOM publishers (2014, Berlin)
- "Ecological living - What architecture for a more sustainable city?", Actes sud/Cité de l'architecture & du patrimoine, Institut français d'architecture (2009)
- "Material Revolution - Sustainable and multi-purpose materials for design and architecture", Sascha Peters, Birkhauser (2011, Basel)
- "Architecture in a Climate of Change - A guide to sustainable design", Peter F. Smith, Architectural Press, Elsevier (Oxford)
- *Cemento*, Storia tecnologia applicazioni, autori, fratelli fabbri editori (1976, Milano)
- "Manuale del cemento - La moderna tecnologia del calcestruzzo", Edizioni tecniche Bauverlag (1961, Milano)

- "Analisi del ciclo di vita LCA - Strumenti per la progettazione sostenibile di materiali, prodotti e processi", Gian Luca Baldo, Massimo Marino, Stefano Rossi, Edizioni Ambiente (2008, Perugia)
- "Life Cycle Design in Architettura - Progetto e valutazione di impatto ambientale dalla materia all'edificio", Carol Monticelli, Maggioli Editore (2013, Milano)
- "Experimentation for char combustion kinetics measurements: Bias from char preparation", Nikita Vorobiev, Manfred Geier, Martin Schiemann, Viktor Scherer, Fuel Processing Technology pp. 155-165 (2016)
- "Influence of volatiles-char interactions between coal and biomass on the volatiles released, resulting char structure and reactivity during co-pyrolysis", Junhao Hua, Yaohui Sia, Haiping Yanga, Jingai Shaoa, Xianhua Wang, Tingzhou Leic, Foster A. Agblevord, Hanping Chena, Energy Conversion and Management pp. 229-238 (2017)

- "Insight into biochar properties and its cost analysis", Mohammad Boshir Ahmed, John L. Zhou*, Huu Hao Ngo, Wenshan Guo, Biomass and Bioenergy pp. 76-86 (2016)
- "Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: Comparing flame curtain kilns to other production methods", Andreas Botnen Smebye, Magnus Sparrevik, Hans Peter Schmidt, Gerard Cornelissen, Biomass and Bioenergy pp. 35-43 (2017)
- "Life cycle environmental and economic performance of biochar compared with activated carbon: A meta-analysis", Hashim A. Alhashimi, Can B. Aktas, Resources, Conservation and Recycling pp. 13-26 (2017)
- "Mutagenic activities of biochars from pyrolysis", JAnna V. Piterina a, J. Kevin Chipman b, J. Tony Pembroke, Michael H.B. Hayes, Science of the Total Environment pp. 674-679 (2017)

- "Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties", Ali Akhtar, Ajit K. Sarmah, *Science of the Total Environment* pp. 408-416 (2018)
- "Optimization of food waste compost with the use of biochar", M. Waqas, A.S. Nizami, A.S. Aburiazaiza, M.A. Barakat, I.M.I. Ismail, *Journal of Environmental Management* pp. 70-81 (2018)
- "Preparation, characterization and environmental/electrochemical energy storage testing of low-cost biochar from natural chitin obtained via pyrolysis at mild conditions", Giuliana Magnacca, Federico Guerrettaa, Alen Vizintinc, Paola Benzia, Maria C. Valsaniaa, Roberto Nisticòda, *Applied Surface Science* pp. 883-893 (2018)
- "Properties of biochar", JKathrin Webera, Peter Quickerb, *Fuel* 217 pp. 240-261 (2018)

- "Pyrolysis production of fruit peel biochar for potential use in treatment of palm oil mill effluent", Su Shiung Lam, Rock Kee Y Liew , Chin Kui Cheng , Nazaitulshila Rasit, Chee Kuan Ooi, Nyuk Ling Ma, Jo-Han Ng, Wei Haur Lam, Cheng Tung Chong, Howard A. Chase, *Journal of Environmental Management* pp. 400-408 (2018)
- "Recent advances in utilization of biochar", Kezhen Qian, Ajay Kumar, Hailin Zhang, Danielle Bellmer, Raymond Huhn, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* pp. 1055-1064 (2015)
- "The feasibility and costs of biochar deployment in the UK", Simon Shackley, Jim Hammonda, John Gauntb & Rodrigo Ibarrola (2015)
- "Structure-mechanics property relationship of waste derived biochars", Oisik Das, Ajit K. Sarmah, Debes Bhattacharyya, *Science of the Total Environment* pp. 611-620 (2015)

- "Synthesis, characterization and evaluation of biochar from agricultural waste biomass for use in building materials", Zahra Asadi Zeidabadi, Somayeh Bakhtiari, Hakime Abbaslou, Ali Reza Ghanizadeh, *Construction and Building Materials* pp. 301-308 (2018)
- "The prospective use of biochar as adsorption matrix - A review from a lifecycle perspective", M.T. Moreira, I. Noya, G. Feijoo, *Bioresource Technology* pp. 135-141 (2017)
- "Two-step gasification of cattle manure for hydrogen-rich gas production: Effect of biochar preparation temperature and gasification temperature", Ya Xin a,b, Hongliang Cao, Qiaoxia Yuan, Dianlong Wang, *Waste Management* pp. 618-625 (2017)
- "Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar", Souradeep Gupta, Harn Wei Kua, Chin Yang Low, *Cement and Concrete Composites* pp. 110-129 (2018)

- "Use of biochar-coated polypropylene fibers for carbon sequestration and physical improvement of mortar", Souradeep Gupta, Harn Wei Kua, Sin Yee Tan Cynthia, Cement and Concrete Composites pp. 171-187 (2017)
- <http://www.wbcdcement.org/index.php/key-issues/sustainability-with-concrete/concrete-recycling>
- <http://www.ilsole24ore.com/art/impresa-e-territori/2018-05-04/co2-emissioni-crescita-italia-32percento-e-europa-18percento--184020.shtml?uid=AE0r4yiE>
- <http://www.infobuildenergia.it/approfondimenti/emissioni-co2-valutare-ciclo-vita-edificio-364.html>
- <http://www.european-biochar.org/en>
- <http://www.ithaka-journal.net/55-anwendungen-von-pflanzenkohle?lang=en>
- <https://it.wikipedia.org/wiki/Biochar>
- <http://www.rinnovabili.it/energia/biomassa/definizionebiomassa>

- <http://www.chimicare.org/curiosita/la-chimica-delle-piante/il-carbone-vegetale-semplce-ammendante-del-terreno-o-nuova-risorsa-rinnovabile/>
- <http://www.openfields.it/sito/wp-content/uploads/2014/01/140128-simposiobiochar.pdf>
- <http://e-biocharbricks.blogspot.com>
- <http://cnrexpolar.blogspot.com/2015/06/edilizia-allevamento-cosmesi-e-altro.html>
- <http://www.energoclub.org/news/dal-simposio-nuove-evidenze-delle-virtu-del-biochar>
- http://www.sogesid.it/sviluppo_sostenibile.html
- <https://www.mosevenezia.eu/wp-content/uploads/2015/06/Pagine-da-2011-Anno-19-pag.-12-29.pdf>
- <http://www.genitronsviluppo.com/2009/04/15/the-natural-step-eric-ezechieli-innovazione-sostenibile/>
- <https://thenaturalstep.org/approach/>

Allegati

Preparation of Mortar

Name:	Isabella
Date:	20/06/2018
Time:	16:25
ID MORTAR:	Mortar

Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplacizer	g	0

w/c ratio =
0.5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none">

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	21/06/2018	time:
Tests 2 days	expected date:	22/06/2018	time:
Tests 7 days	effective date:		
Tests 7 days	expected date:	26/06/2018	time:
Tests 7 days	effective date:		
Tests 28 days	expected date:	17/07/2018	time:
Tests 28 days	effective date:		

Preparation of Mortar		
Name:	Rocio	
Date:	22/06/2018	
Time:	09:50	
ID MORTAR:	Mortar	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplacizier	g	0
Carbonato di calcio	g	0

w/c ratio = 0.5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none"> • • •

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	23/06/2018	time:
Tests 2 days	expected date:	24/06/2018	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	28/06/2018	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	19/07/2018	
	effective date:		time:

Preparation of Mortar		
Name:	Luciana/Isabella	
Date:	07/06/18	
Time:	12:46	
ID MORTAR:	Mortar_BC1.0	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer "Dynamon Sp1 Mapei"	g	4,5
Biochar	g	4,5

w/c ratio = 0,5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none"> • very liquid mixture • •

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	08/06/18	time: 14:30
Tests 2 days	expected date:	09/06/18	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	13/06/18	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	04/07/18	
	effective date:		time:

Preparation of Mortar		
Name:	Daniel/Yasmine	
Date:	19/06/2018	
Time:	13:20	
ID MORTAR:	Mortar_BC2%	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplacizier	g	0
Biochar	g	9

w/c ratio = 0.5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none"> • biochar and water mixed with spoon • •

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	20/06/2018	time:
Tests 2 days	expected date:	21/06/2018	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	25/06/2018	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	16/07/2018	
	effective date:		time:

Preparation of Mortar		
Name:		
Date:		27/06/18
Time:		14:34
ID MORTAR:		Mortar_BC_2%
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer	g	0
Biochar	g	9

w/c ratio = 0,5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none"> • biochar added in cement • •

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	28/06/18	time:
Tests 2 days	expected date:	29/06/18	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	03/07/18	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	24/07/18	
	effective date:		time:

Preparation of Mortar		
Name:		
Date:	27/06/18	
Time:	15:02	
ID MORTAR:	Mortar_BC_2%_7D_S	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer	g	0
Biochar	g	9

w/c ratio = 0,5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none"> • biochar added in cement • •

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	28/06/18	time:
Tests 2 days	expected date:	29/06/18	time:
	effective date:		
Tests 7 days	expected date:	03/07/18	time:
	effective date:		
Tests 28 days	expected date:	24/07/18	time:
	effective date:		

Preparation of Mortar		
Name:		
Date:		29/06/18
Time:		12:02
ID MORTAR:		Mortar_BC_5%_7D_S
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer	g	0
Biochar	g	22.5

w/c ratio = 0,5

NOTE:
•
•
•

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	30/06/18	time:
Tests 2 days	expected date:	01/07/18	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	05/07/18	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	26/07/18	
	effective date:		time:

Preparation of Mortar		
Name:		
Date:	29/06/18	
Time:	13:01	
ID MORTAR:	Mortar_BC_5%_28D_S	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer	g	0
Biochar	g	22.5

w/c ratio = 0,5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none">

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	30/06/18	time:
Tests 2 days	expected date:	01/07/18	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	05/07/18	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	26/07/18	
	effective date:		time:

Preparation of Mortar		
Name:		
Date:	19/07/18	
Time:	11:04	
ID MORTAR:	Mortar_BC_2%_7D_S(2)	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	450
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer	g	0
Biochar	g	9

w/c ratio = 0,5

NOTE:
•
•
•

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl
Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u>
Add the sand steadily during the next <u>30 s</u>
Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u>
<u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall
Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	20/07/18	time:
Tests 2 days	expected date:	21/07/18	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	25/07/18	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	15/08/18	
	effective date:		time:

Preparation of Mortar		
Name:		
Date:	05/09/18	
Time:	10:50	
ID MORTAR:	Mortar_BC_2%_SOST	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	441
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer	g	0
Biochar	g	9

w/c ratio = 0,5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none"> • biochar added in water • •

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	06/09/18	time:
Tests 2 days	expected date:	07/09/18	time:
	effective date:		
Tests 7 days	expected date:	11/09/18	time:
	effective date:		
Tests 28 days	expected date:	02/10/18	time:
	effective date:		

Preparation of Mortar		
Name:		
Date:	05/09/18	
Time:	11:18	
ID MORTAR:	Mortar_BC_2%_SOST_S	
Materials	Quantity	
Cement "CEM I 52,5 R Ultracem Italcementi"	g	441
Deionized Water	g	225
CEN Standard Sand	g	1350
Superplasticizer	g	0
Biochar	g	9

w/c ratio = 0,5

NOTE:
<ul style="list-style-type: none"> • biochar added in cement • •

MIXING OF MORTAR PROCEDURE - UNI EN 196-1
Place the cement and the water into the bowl Start the mixer at the <u>low speed</u> for <u>30 s</u> Add the sand steadily during the next <u>30 s</u> Switch the mixer to the <u>high speed</u> and continue mixer for an additional <u>30 s</u> <u>Stop</u> the mixer for <u>90 s</u> ; during the first 30 s, remove mortar adhering to the wall Continue the mixing at the <u>high speed</u> for <u>60 s</u>

Formwork removal	date:	06/09/18	time:
Tests 2 days	expected date:	07/09/18	
	effective date:		time:
Tests 7 days	expected date:	11/09/18	
	effective date:		time:
Tests 28 days	expected date:	02/10/18	
	effective date:		time:

COMMITTEE
**UNIV. PARMA - Dipartimento di Scienze
Chimiche, della Vita e della Sostenibilità
Ambientale**
Parco Area delle Scienze, 11/a
43124 PARMA PR

Modena (Italy), li 27/10/2017

Data Inizio Analisi 16/10/2017
Data di accettazione 16/10/2017

RAPPORTO DI PROVA n° 17P13246-It-0

CAMPIONE 17P13246

Descrizione dichiarata: MATERIALE CARBONIOSO "BORGOTARO GRIGIO" - DATA ARRIVO CAMPIONE 16/10/2017,
CAMPIONAMENTO ESEGUITO DA: COMMITTEE, TRASPORTO EFFETTUATO DA: CORRIERE.
Stato all'arrivo in Laboratorio: temperatura ambiente

DESCRIZIONE ANALISI	RISULTATO	U	REC. %	LIMITA DI MISURA	LO	LD	METODO	DATA FINE ANALISI
RICERCA DI METALLI E NON METALLI IN ICP								
Arsenico come As [331]	0,364		± 0,136	mg/kg			ICP-MS-PT - ICP mass	25/10/2017
Cadmio come Cd [331]	1,94		± 0,56	mg/kg			ICP-MS-PT - ICP mass	25/10/2017
Cromo come Cr [331]	6,35		± 1,54	mg/kg			ICP-MS 12m - ICP mass	25/10/2017
Ferro come Fe	1310		± 197	mg/kg			MOS/ICP-OES - ICP optical	27/10/2017
Magnesio come Mg	1,52		± 0,23	g/100 g			MOS/ICP-OES - ICP optical	27/10/2017
Mercurio come Hg	< LQ			mg/kg	0,005		ICP-MS-PT - ICP mass	25/10/2017
Nichel come Ni [331]	59,0		± 10,2	mg/kg			ICP-MS-PT - ICP mass	25/10/2017
Piombo come Pb [331]	11,3		± 2,5	mg/kg			ICP-MS-PT - ICP mass	25/10/2017
Potassio come K	6,07		± 0,91	g/100 g			MOS/ICP-OES - ICP optical	27/10/2017
Rame come Cu	57,2		± 8,6	mg/kg			MOS/ICP-OES - ICP optical	27/10/2017
Sodio come Na	0,115		± 0,017	g/100 g			MOS/ICP-OES - ICP optical	27/10/2017
Zinco come Zn	230		± 35	mg/kg			MOS/ICP-OES - ICP optical	27/10/2017

FINE RAPPORTO DI PROVA

- File con Firma Digitale autorizzata dall'Ordine dei Chimici: 17P13246-It-0-DigitalSignature.pdf

Note e Riferimento metodi:

< LQ: Inferiore al Limite di Quantificazione. Il dato di incertezza di misura non è sinonimo di qualche forma di positività ma solamente della performance del metodo. In caso di campionamento effettuato da Neutron, il laboratorio applica la Procedura Operativa Interna codice: NEOT-DIR/006/53

U: L'incertezza riportata è l'incertezza estesa calcolata utilizzando un fattore di copertura pari a 2 che dà un livello di fiducia approssimativamente del 95%. Per le ricerche microbiologiche sono indicati il limite inferiore e superiore dell'intervallo di confidenza con livello di probabilità del 95% K=2, o l'intervallo di confidenza stesso. I risultati delle prove microbiologiche sono emessi in accordo a quanto previsto dalla norma ISO 7218:2007/AmD 1:2013. Quando i risultati sono espressi con <4 (UFC/ml) o <40 (UFC/g) i microrganismi sono presenti ma in numero inferiore a 4 (UFC/ml) o 40 (UFC/g) rispettivamente.

LQ: Limite di Quantificazione: è la più bassa concentrazione di analita nel campione che può essere rivelata con accettabile precisione (ripetibilità) e accuratezza in condizioni ben specificate. Si precisa che ogni risultato espresso come <LQ non indica, in ogni caso, l'assenza del parametro ricercato nel campione in esame.

LD: Limite di Rilevabilità: è la più bassa concentrazione di analita nel campione che può essere rivelata ma non necessariamente quantificata in condizioni ben specificate.

Pareri di conformità: valori conformi e non conformi a leggi, decreti, normative nazionali e comunitarie, specifiche fornite dal cliente sono valutati caso per caso anche tenuto conto dell'incertezza di misura delle singole prove e delle norme relative all'arrotondamento dei valori, e indicati quando sono ritenuti non conformi.

>>> Rec%: Recupero%: "*" indica che il recupero è stato applicato al risultato. >>> I risultati numerici compresi tra parentesi () dopo l'espressione <LQ sono puramente indicativi di tracce non esattamente quantificabili.

Note parametri:

[331]: Incertezza estesa calcolata secondo l'equazione di HORWITZ utilizzando un fattore di copertura pari a 2 che dà un livello di fiducia del 95%.

RAPPORTO DI PROVA VALIDO A TUTTI GLI EFFETTI DI LEGGE ai sensi dell'art.16 R.D. 1-3-1928 n°842 - artt.16 e 18 Legge 19-7-1957 n°679 D.M. 25-3-1986.

I dati espressi nel presente rapporto di prova si riferiscono al solo campione provato in laboratorio. La denominazione o qualsiasi altro riferimento del campione sono dichiarati dal cliente. La riproduzione parziale deve essere autorizzata con approvazione scritta dal ns. Laboratorio. ARCHIVIAZIONE DATI E CONSERVAZIONE CAMPIONI: Dati grezzi e tracciali cromatografici sono archiviati per anni 5. Un controcampione è conservato per mesi 2.

RESPONSABILE DI LABORATORIO: IL CHIMICO DOTT. GIAN CARLO GATTI - N. 124 ORDINE DEI CHIMICI MODENA - MEMBER OF AOAC N. VM 90231001 - EURCHEM
Approvato dal Responsabile analisi per la sezione METALLI

NEOTRON SPA
Stradale Agazzoli, 104
41125 MODENA - ITALY
Tel: +39 059461711 - Fax: +39 059461777
www.neutron.it - neutron@neutron.it

GMP Pharmaceutical Laboratories Authorized by AIFA Italian Medicine Agency n° aM-55/2015.
Laboratorio Qualificato D.M. 26-2-87 Art. 4 - Legge 46/82 per la Ricerca Applicata e Innovazione Tec
Regione Emilia Romagna - AUTORIZZAZIONE Autocontrollo N° 008/MO/008
B/N-Monitoring Fruit and Vegetables Approved Laboratory
I-Monitoring EDEKA AG Fruit and Vegetables Registered Laboratory



Introduzione

Il biochar è un materiale carbonioso derivante dalla termoconversione delle biomasse. Esso vanta diversi settori di applicazione, tra cui risulta notevolmente interessante il suo impiego come ammendante per il terreno. Il biochar è infatti in grado di aumentare la capacità del suolo di trattenere acqua e nutrienti, riducendo così la necessità di utilizzare fertilizzanti¹ (Lee et al. *Bioresource Technology* 2013, 148,196–201). Inoltre, esso riduce le emissioni di alcuni gas ad effetto serra, quali N_2O e CH_4 , dal suolo e soprattutto può essere una riserva di carbonio per un tempo sufficientemente lungo, grazie alla sua notevole resistenza alla decomposizione biologica¹. Ad ogni modo, al fine di essere utilizzato a tal scopo, questo materiale deve soddisfare alcuni requisiti specifici emanati dal Decreto Legislativo No 75/2010. Questo, tra le varie cose, stabilisce la quantità massima di metalli pesanti ed idrocarburi policiclici aromatici (IPA) che il biochar può contenere e decreta i valori di pH che deve avere. Per tale ragione è stato necessario analizzare i campioni di biochar che ci sono stati forniti, allo scopo di verificare se questi siano o meno in linea con i requisiti in questione. Da un punto di vista chimico le analisi che sono state condotte, sono le seguenti: gas-cromatografia (GC-MS), misure del valore di pH, analisi termogravimetrica ed infine è stata valutata la densità dei campioni mediante l'uso di un picnometro.

Parte Sperimentale

Analisi GC-MS

Come prima cosa 5g di ogni campione di biochar (Rebaf 1, Correggio, Modena Conifere e Modena 171115) sono stati estratti con 300 ml di una miscela di acetone: esano = 1:1 per dieci ore con un apparato Soxhlet; il solvente è stato poi evaporato tramite rotavapor ed è stato pesato il tutto. La frazione estratta è stata poi recuperata con la miscela acetone: esano = 1:1 (1-2 ml), adsorbita su una piccola colonna di silice (5 ml), recuperata lavando con 5 ml della solita miscela ed infine seccata.

Successivamente una quantità nota dell'estratto (2.8, 23.6, 19.6 e 81.4 mg rispettivamente) è stata recuperata con toluene (28, 236, 196 e 814 μl rispettivamente), vi è stata aggiunta una quantità di difenile, utilizzato come standard interno, calcolata in funzione dell'estratto, precisamente mg

estratti: mg difenile= 10:1, ed iniettato in uno strumento gas-massa (GC-MS) per valutare l'eventuale presenza di idrocarburi policiclici aromatici (1 µl split mode 1/20 ratio).

Lo strumento utilizzato è un GC-MS (Agilent) equipaggiato con una colonna capillare di 30m (0.25mm i.d., 0.25 µm f.t) connessa con una pre colonna in silice di 5m (i.d. 0.53 mm). I dati sono stati registrati in una modalità di scansione di 70eV (41-440 m/z). Una miscela standard contenente 16 IPA comuni è stata iniettata nelle stesse condizioni per permettere l'identificazione e la quantificazione degli idrocarburi policiclici aromatici eventualmente presenti nei campioni di biochar.

Per quanto concerne, invece, i campioni Modena Tomaselli, Borgotaro Nero e Borgotaro Grigio, questi sono stati sempre estratti mediante miscela acetone:esano=1:1 e vi è stato fatto il cleanup, le analisi però sono state effettuate presso il centro di analisi Neutron di Modena.

I quantitativi di IPA calcolati sono riportati in Tabella 1.

Misure di pH

Una sospensione acquosa omogenea è stata preparata secondo un rapporto in peso biochar: acqua 1:10 e dopo 1,30 h di agitazione è stato misurato il pH usando un pH-metro Crison PH meter Basic 20.

I valori di pH sono riportati in Tabella 2.

Analisi termogravimetrica

L'analisi termogravimetrica (TGA) è stata condotta utilizzando uno strumento Perkin Elmer Pyris 1 TGA. Durante un tipico esperimento, il campione (circa 2 mg) viene inserito in un crogiolino di alluminio, l'analisi viene eseguita alla velocità di 30 °C/min da 30 a 900 °C sotto N₂. Per alcuni campioni è stata effettuata un'ulteriore analisi sotto flusso di aria.

Spettroscopia Infrarossa (FTIR-ATR)

Pochi mg di campione sono stati adagiati su un cristallo di diamante e l'analisi infrarossa è stata registrata in modalità riflettanza totale attenuata (ATR).

Misure al picnometro

Durante un tipico esperimento, il campione (circa 30 mg) viene inserito all'interno di una cella campione e l'analisi viene effettuata. I valori di densità ottenuti sono riportati in Tabella 4.

Risultati e Discussione

Analisi GC-MS

Tabella 1: Contenuto di IPA (mg/kg) presente nei campioni di biochar.

Sample	1	2	3	4	5	6	7
Name	Correggio (mg/kg)	MO Confere (mg/kg)	MO 171115 (mg/kg)	Rebaf (mg/kg)	MO Tomaselli (mg/kg)	Borgotaro Grigio (mg/kg)	Borgotaro Nero (mg/kg)
Naphtalene	< LOD	< LOD	12,53	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Acenaphthylene	< LOD	< LOD	0,00	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Acenaphthene	< LOD	< LOD	19,55	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Fluorene	< LOD	< LOD	5,76	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Phenanthrene	< LOD	< LOD	48,12	< LOD	0,15	0,25	83,7
Anthracene	< LOD	< LOD	0,00	< LOD	< LOD	< LOD	9,7
Fluoranthene	< LOD	< LOD	32,33	< LOD	< LOD	< LOD	7,7
Pyrene	< LOD	< LOD	32,33	< LOD	< LOD	< LOD	5,4
Benzo(a)anthracene	< LOD	< LOD	4,51	< LOD	< LOD	< LOD	0,17
Chrysene	< LOD	< LOD	3,51	< LOD	< LOD	< LOD	0,17
Benzo(b)fluoranthene	< LOD	< LOD	6,01	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Benzo(a)pyrene	< LOD	< LOD	2,00	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Benzo(b)pyrene	< LOD	< LOD	2,25	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
total of PAH	< LOD	< LOD	168,91	< LOD	0,15	0,25	106,84

LOD: 0.050 mg/kg

La Tabella 1 evidenzia il contenuto totale di IPA presente nei biochar analizzati. Per quanto concerne i campioni Rebaf 1, derivante dalla gassificazione del bamboo, Correggio e Modena Confere, che invece è stato generato dalla gassificazione di legno appartenente a conifere, la quantità di IPA è sotto il limite di rivelazione (LOD) dello strumento. Al contrario per quanto riguarda i campioni Modena 171115, Borgotaro Nero questi presentano una quantità maggiore di IPA pari a 168,91 e 106,84 ppm rispettivamente.

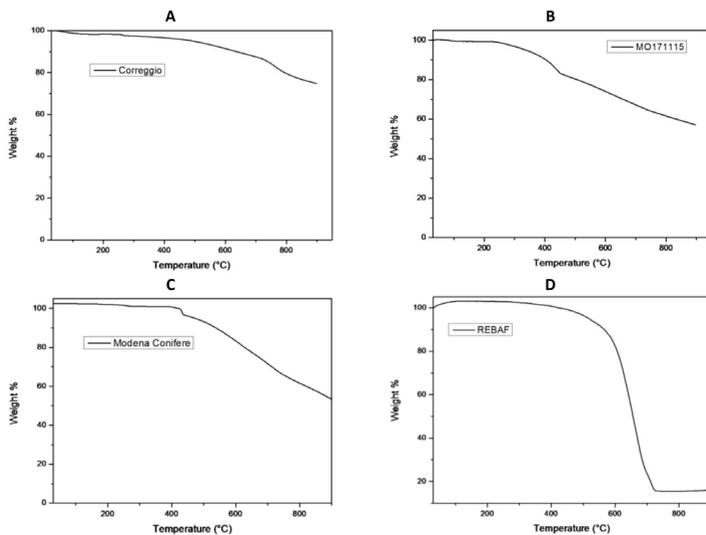
Misure di pH

Tabella 2: Valori di pH misurati per i campioni di biochar.

SAMPLES	pH	pH 24 h	pH 5 d
Correggio	9.03	9.07	9.17
MO Conifere	9.42	9.57	9.94
MO 171115	10.17	10.32	10.54
Rebaf 1	9.48	9.57	9.6
BORGOTARO GRIGIO	10.22	10.80	10.95
BORGOTARO NERO	9.86	9.87	10.03
MO TOMASELLI	8.3	8.6	9.1

Come ci si aspettava i campioni di biochar testati sono alcalini (pH ca. 9); probabilmente a causa della presenza di: gruppi funzionali organici, carbonati o alcali inorganici¹. Il comportamento basico del biochar risulta utile per neutralizzare l'acidità dei terreni aumentandone la produttività.

Analisi termogravimetrica (TGA)



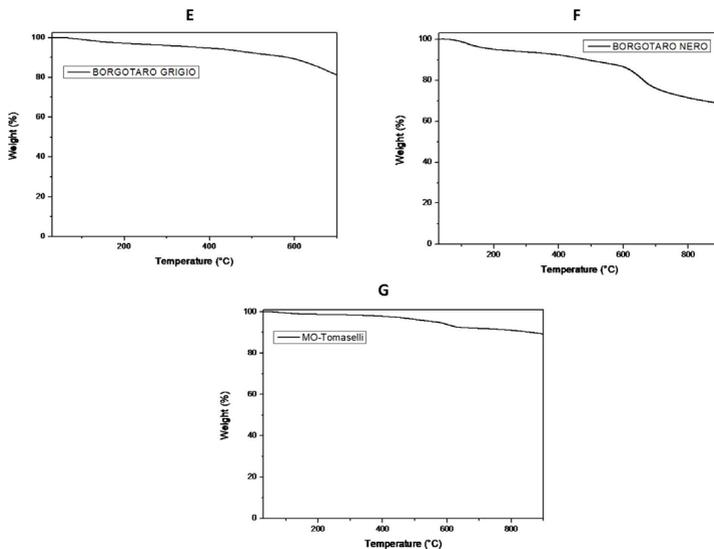


Figura 1: Termogrammi di **A:** Correggio, **B:** Modena 171115, **C:** Modena Conifere ,**D:** Rebaf, **E:** Borgotaro Grigio, **F:** Borgotaro Nero e **G:** Modena Tomaselli. Le analisi termo gravimetriche sono state condotte sotto flusso di N₂.

Dalla Figura 1 appare evidente che i campioni di biochar presentano un diverso comportamento all'aumentare della temperatura: Correggio, Modena Tomaselli e i due campioni provenienti da Boegotaro risultano essere i campione più stabili termicamente, seguiti dai campioni Modena Conifere e Modena 171115; al contrario il campione Rebaf degrada completamente a 800 °C. La termostabilità di un biochar dipende dalla temperatura alla quale questo è stato generato: infatti con l'aumentare della temperatura si originano, all'interno del materiale, forme di carbonio più stabili con un'alta resistenza al calore² (Kim et al. *Bioresource Technology*, 2012, **118**, 158–162). Alla luce di quanto appena detto, si può quindi assumere che questi campioni sono prodotti di termoconversioni avvenute a temperature diverse e specificatamente: i più stabili sono stati generati alla temperatura maggiore, mentre Rebaf a quella minore.

Al fine di verificare se la % in peso residua è realmente dovuta a forme più stabili del carbonio formatesi durante la gassificazione, sono state condotte analisi termo gravimetri che in aria considerando il fatto che i composti organici, al contrario di quelli inorganici, tendono a dare reazione di combustione in presenza di ossigeno.

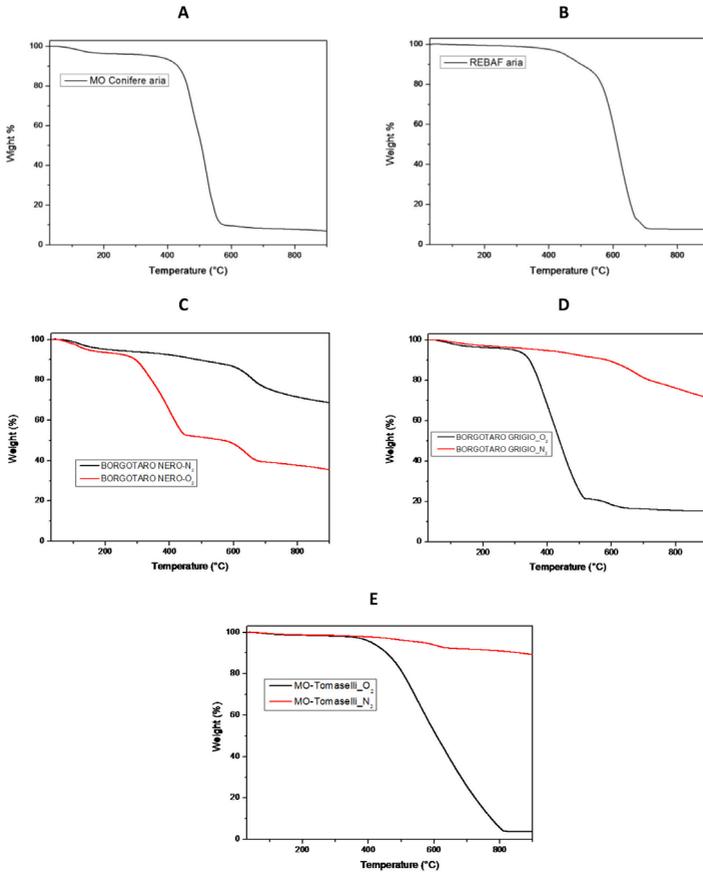


Figura 2: Termogrammi dei campioni **A:** Modena Conifere, **B:** Rebafe, **C:** Borgotaro Nero, **D:** Borgotaro Grigio e **E:** Modena Tomaselli. Le analisi termo gravimetriche sono state condotte in aria.

I termogrammi (Figura 2) dei campioni analizzati hanno infatti evidenziato una minore % in peso residua proprio a causa della combustione delle forme più stabili di carbonio. Per quanto concerne, invece, la frazione incombusta, questa potrebbe essere attribuita alla presenza di composti inorganici o metalli.

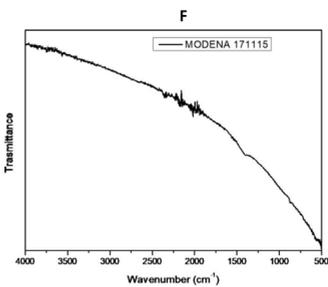
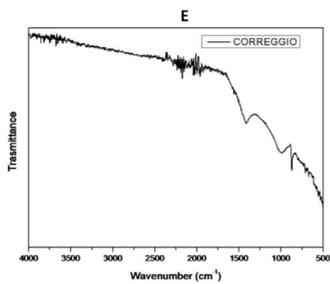
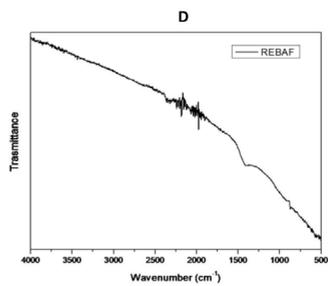
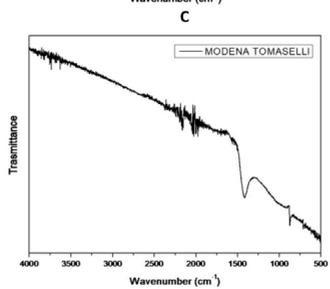
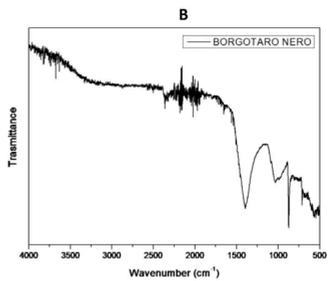
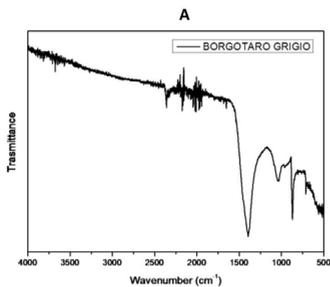
Analisi ICP-MS

Tabella 3: Quantità di metalli pesanti calcolata mediante spettrometria di massa a plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS).

Sample	1	2	3	4	5
Name	Borgotaro Nero (mg/kg)	Borgotaro Grigio (mg/kg)	MO Tomaselli (mg/kg)	Rebaf (mg/kg)	MO Conifere (mg/kg)
As	0,680	0,364	1,23	0,199	0,381
Cd	1,43	1,94	0,044	0,037	0,059
Cr	12,8	6,35	9,75	3,05	3,41
Fe	2293	1310	2327	734	4811
Mg	0,908	1,52	3800	2950	985
Hg	< LOD	< LOD	< LOD	<LOD	0,008
Ni	22,0	59,0	7,07	2,34	3,91
Pb	4,42	11,3	1,40	10,9	1,45
K	6,41	6,07	14900	9630	32500
Cu	39,5	57,2	22,7	14,9	8,46
Na	0,126	0,115	635	233	380
Zn	284	230	32,0	20,5	158

Le quantità sottolineate in giallo sono superiori ai limiti consentiti per legge.

FTIR-ATR



G

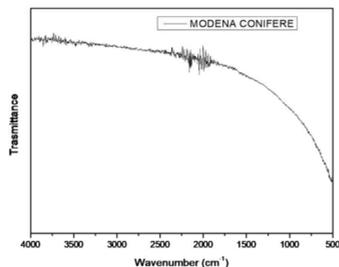


Figura 3: Spettri ATR dei campioni **A:** Borgotaro Grigio, **B:** Borgotaro Nero, **C:** Modena Tomaselli, **D:** RebaF, **E:** Correggio, **F:** Modena 171115 e **G:** Modena Conifere.

Gli spettri ATR riportati in Figura 3 evidenziano per i campioni **A**, **B**, **C** ed **E** alcuni picchi caratteristici quali il picco a 1410 cm^{-1} che potrebbe essere attribuibile alla presenza di ioni carbossilati R-COO^- ed il picco intorno a 876 cm^{-1} probabilmente appartenente ad anelli aromatici presenti nei campioni.

Misure di densità

I campioni di biochar sono stati altresì analizzati mediante picnometro. Un picnometro è uno strumento che utilizza elio (purezza 99.995%) per determinare il volume dei campioni, misurando il cambiamento di pressione dell'elio stesso all'interno di un determinato volume. Specificando il peso del campione, la densità si ottiene poi automaticamente³ (Viana et al. *Talanta*, 2002, **57**, 583–593).

Tabella 4: Valori di densità ottenuti per i campioni di biochar.

SAMPLES	DENSITY (g/cc)	STD. DEV.
REBAF	0,5565	0,0021
CORREGGIO	n.c.	n.c.
MO CONIFERE		
MO 171115		

In Tabella 4 sono riportati i valori di densità per i campioni di biochar. Per quanto concerne RebaF la densità ottenuta è in linea con quanto ci si aspettava al contrario per gli altri campioni non è stato possibile valutare la densità.

Conclusioni

I campioni di Biochar sono stati analizzati tramite diverse tecniche analitiche, i contenuti degli IPA risulta essere inferiore al limite consentito per legge per tutti i campioni ad eccezione dei campioni MODENA 171115 e Borgotaro Nero. I pH risultano essere alcalini per tutti i campioni e le loro termostabilità sono decisamente buone; purtroppo per tutti i campioni i valori di Cr (VI) sono superiori al limite consentito per legge.

Scheda Tecnica
i.tech ULTRACEM 52,5 R
CEM I 52,5 R

Descrizione

i.tech ULTRACEM 52,5 R è un cemento Portland tipo I ad altissima resistenza normalizzata ed a resistenza iniziale elevata

Composizione

Contiene, conformemente alla composizione prescritta dalla norma UNI EN 197-1 (riferita cioè alla massa del cemento ad esclusione del solfato di calcio e degli additivi), 95% + 100% di clinker, mentre la restante parte è costituita da eventuali costituenti secondari.

Requisiti di norma (UNI EN 197-1)

REQUISITI CHIMICI*

Perdita a fuoco	≤ 5,0%
Residuo insolubile	≤ 5,0%
Solfati (come SO ₃)	≤ 4,0%
Cloruri	≤ 0,10%

REQUISITI FISICI*

Tempo di inizio presa	≥ 45 min
Espansione	≤ 10 mm

REQUISITI MECCANICI*

Resistenze alla compressione

2 giorni	≥ 30,0 MPa
7 giorni	N.R.
28 giorni	≥ 52,5 MPa

* dati caratteristici



Utilizzo

Le elevate resistenze meccaniche in particolare alle brevi stagionature ne rendono ideale l'impiego per:

- la prefabbricazione (con o senza ciclo termico), specialmente per strutture di rilevante impegno statico e/o architettonico;
- strutture gettate in opera precomprese;
- strutture non precomprese in elevazione o morfologicamente snelle;
- manufatti e/o getti che necessitano di scasserature e/o movimentazioni veloci;
- opere di gunitaggio ("spritz beton").

Vantaggi

Sono notevoli i vantaggi conseguibili nei trattamenti di stagionatura con vapore: alle elevate resistenze finali fanno infatti riscontro le elevate resistenze anche a 16 e 24 ore. Il rapido sviluppo del calore di idratazione del prodotto offre la possibilità di realizzare getti di calcestruzzo in climi rigidi e di ridurre i costi energetici nei trattamenti termici.

Precauzioni

Si consiglia l'uso del prodotto per opere di mole contenuta. Per lavori che prevedono l'utilizzo di grandi masse di calcestruzzo si consiglia di orientare la scelta, in funzione dei calcoli progettuali ed esecutivi, al cemento i.work TECNOCEM A-LL 42,5 R o ai nostri prodotti a ridotto sviluppo di calore d'idratazione (Ferrico AA.R.S, Ferrico Pozzolatico AA.R.S., pozzolanici e alla loppa).

Confezionamento e stoccaggio

Il periodo di conservazione è riportato sul D.D.T ed eventualmente, ove disponibile, sul sacco.

Prodotto a uso professionale. L'uso del prodotto dovrà essere basato su ricerche e valutazioni proprie dell'applicatore.

Italcementi
i.lab (Kilometro Rosso)
Via Stezzano, 87
24126 Bergamo - Italia
Tel. +39 035 396 111
www.italcementi.it
www.i-nova.net

Assistenza Tecnica
N° Verde 800 820 116
sat@italcementi.net

Scheda aggiornata a novembre 2013





Société Nouvelle du Littoral

Siège Social & Usine : Z.A. – BP 9 – 11370 LEUCATE (France)
Tél. : 33 (0) 4 68 40 14 05 – Fax : 33 (0) 4 68 40 92 72
Internet : www.s-n-l.fr - e-mail : contact@s-n-l.fr • s.n.l@wanadoo.fr

**SABLE NORMALISE CEN
CERTIFIE CONFORME - EN 196.1
par l'AFNOR**

Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des
Matériaux de la Ville de Paris (L.E.M.V.P.)
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy
75014 PARIS

SAFETY DATA SHEET FOR SILICEOUS STANDARD SAND

1 – Identification of the substance/Preparation and of the Company/Undertaking

- Identification of the substance or preparation : STANDARD SANDS
- Use of the substance/preparation: Determination of strengths of cement mortar
- Supplier codes : Standard sand EN 196-1 & ISO 679 - Standard sand EN 196-9 - Standard sand BS 1881 part 131 A 1/2,5 . B 0,7/1,3 . C 0,3/0,6 . D 0,1/0,315 . E 0,05/0,25 - Standard sand ASTM C778 - Standard sand NF P98 216.1.
Company/undertaking identification: S.N.L. - Z.A. - 11370 LEUCATE (France) -
Phone. : 33 (0) 4 68 40 14 05 - Fax: 33 (0)4 68 40 92 72 - E.mail : s.n.l@wanadoo.fr or contact@s-n-l.fr
Emergency telephone: ORFILA (INRS) + 33 (0) 145 425 959

2 - Hazard identification :

- Silica sand does not present dangers in itself. However alveolar particles can be produced when handled. These particles can affect health.
 - Health hazards: inhalation of alveolar crystalline silica for prolonged periods or very long periods can cause pulmonary fibrosis, generally referred to as silicosis.
 - Environment hazards: none
 - Chemical and physical hazards: none
 - Specific risks: silicosis
 - Main symptoms: The main symptoms of silicosis are coughing and difficulty breathing. Exposure to dust must be controlled and recorded.

3 – Composition/Information on ingredients

Chemical characteristics: Quartz - Also known as Silica sand (SiO₂)
C.A.S. N°: 14808-60-7
EINECS N°: 238-878-4
Hazardous components: Quartz
Classification: Crystalline silica has not yet been given a classification by the European Community.
Exempted from registration number in compliance with REACH article2 §7.b and annex V.

4 – First aid measures :

Name of product : Standard sand

Update : 06/2009

PAGE : - 1 -



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CIMENTS



Medical steps should be taken in accordance with the areas exposed:

- If inhaled: remove to fresh air and consult a doctor
- If there has been contact with the skin: wash
- If there has been contact with eyes: wash eyes
- If ingestion: non-toxic
- Protection for first aid administrators: none required
- Instructions for the doctor: no specific instructions

5 – Fire-Fighting Measures

- Not flammable and not explosive
- Any means of extinction

6 – Accidental release measures

- Safety precautions for the individual: avoid the formation of dust. A specifically adapted breathing apparatus should be worn in a dusty atmosphere
- Precautions to protect the environment: no special precautions
- Method for cleaning: avoid dry sweeping. Use a steam or vacuum system to avoid creating dust

7 – Handling and storage

- Handling (technical steps and precautions advice for use): Avoid creating dust, install appropriate ventilation in areas where dust is created. Where there insufficient ventilation, wear an appropriate breathing apparatus. Change and wash dusty clothing.
- Storage (Technical measures and precautionary steps): Collect and filter dust produced in the use of sand. Keep all containers closed.

8 – Exposure controls/Personal protection

- - Control of exposure (for all dutis with no specific effects the limits regulated to art. R232..5.5. of French Labour Code):
 - 10 mg/m³ for total dust
 - 5 mg/m³ for alveolar dust

France about silica, according to decree n° 97-331 of April 10, 1997 the limit of the average amount of concentrated free alveolar crystalline silica which can be inhaled by a worker in 8 hours is set at 0.1 mg/m³ for the quartz.

Furthermore, a formula exists (additional clause) which makes it possible to check if the upper limit has been observed, when a mixture of alveolar dust made up partly of silica, in one or several forms, and partly of non silica dust exists

$$Cns / 5 + Cq / 0.1 + Cc / 0.05 + Ct / 0.05 = 1$$

(Cns, Cq, Cc, Ct represent respectively the dust Concentrations: non silica dust, quartz, cristobalite and tridymite, expressed in mg/m³). Each of these values is represented in the formula at the permitted levels.

Other Countries: Please refer to the annotation detailing various relevant legislation of which we are aware to date.

Personal protection equipment :

- Breathing protection when there is exposure to dust at higher levels than permitted by legislation wears a specially adapted protective breathing mask.
- Hand protection: none
- Eye protection: wear goggles with eye shields
- Skin and body protection: none
- Hygiene consideration:
 - do not shake work clothes
 - do not clear compressed air of dust

9 – Physical and chemical properties

Name of product : Standard sand

Update : 06/2009

PAGE : - 2 -



S.N.L. fondée en 1910 - SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 - SIRET 976 750 257 00025 APE 0912Z
Certifiée pour la PRÉPARATION DU SABLE NORMALISÉ CEN POUR LA DÉTERMINATION DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES DES CEMENTS



- Physical state: solid
- SiO₂: > 95 %
- Form: crystalline
- Form of grains: subangular - Color: white - Smell : odourless - pH: # 7
- Specific temperature for changes in physical state:
 - Fusion temperature: 1610° C
 - boiling temperature: 2230° C
- Decomposition temperature: none
- Flash Point: not applicable
- Self-inflammation temperature: not applicable
- Explosive characteristics: not applicable
- Mass volume: absolute: 2,63 g/m³ - apparent: 1,6 g/cm³
- Solubility: insoluble in water, soluble in hydro-fluoric acid

10 – Stability and reactivity:

Chemically stable, no particular incompatibilities

11 – Toxicological information :

Effects of acute exposure:

Oral	LD50	4 894 mg/kg (rat)
Skin	LD 50	48 mg/kg (mouse)
Inhalation	LC 50/4 h	9 980 mg/l (mouse)

Primary effect of irritation:

- Skin contact: irritating to skin and mucous membrane
- Eye contact: irritating

No sensitization effect known

Reproductive effect, Carcinogenicity, mutagenicity, toxicity :

Increased cancer risk would be limited to people already suffering from silicosis. Worker protection against silicosis would be assured by respecting the existing regulatory occupational exposure limits and implementing additional risk management measures where required (see§ 16).

Chronic toxic: silicosis

Prolonged or very long exposure to alveolar dust containing quartz can cause silicosis which is a pulmonary fibrosis caused by deposits of alveolar crystalline silica a in the lungs.

12. – Ecological information

- No effect known. Natural product widely spread in the world.

13. – Disposal considerations

- Disposal instruction: waste from residual materials / Products not used:
- These can be disposed according to local regulations. The material should be covered to prevent breathable dust particles escaping. The silica sand has not been included in the EU Waste Catalogue.
- Where and when possible recycling is preferable to disposal.
- Containers: There are no specific conditions, just avoid dust emission during handling.

14. – Transport information

Name of product : Standard sand

Update : 06/2009

PAGE: - 3 -



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z
 Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CEMENTS



- There are no specific precautions mentioned in the legislation governing the transport of dangerous materials. Avoid creating dust.

15. – Regulatory information

- Refer to limits set out in the legislation of each country; OEL (Occupational Exposure Limit) for respirable crystalline silica dust, measured as an 8 hours TWA (Time Weighted Average).
- The material has not been classified by the European Community in legislation governing carcinogenic substances.
- French legislation refer to dangerous chemical agent regulations.

16. – Other information

- Mixing with other products: When products not made or supplied by our company are used, it is the responsibility of the client to obtain all the technical information from the supplier or manufacturer and any other information relating to these products, and to obtain all other relevant information.
- No responsibility will be accepted where our products are used with others.
- Liability: This information reflects our current knowledge and we consider it accurate and reliable at the time of updating this sheet. Nevertheless, we are not giving an opinion, not offering cautions or guarantees that we have provided the latest information available or that this information is reliable and comprehensive.
- It is the responsibility of the user to establish that this information is complete and adapted to the use which will be made of our products.
- A good practices Guide about "Worker health protection during handling of crystalline silica" is available from <http://www.nepsi.eu>

Name of product : Standard sand

Update : 06/2009

PAGE : - 4 -



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z
Certifiée pour la PRÉPARATION DU SABLE NORMALISÉ CEN POUR LA DÉTERMINATION DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES DES CEMENTS



