POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Architettura

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

DA RIFIUTO A RISORSA:

REIMPIEGO DI UN RIFIUTO COME MATERIA PRIMA SECONDARIA PER LA PRODUZIONE DI UN BLOCCO DI FANGO DI SEGAGIONE E COCCIOPESTO ALCALI-ATTIVATO, UTILE ALLA REALIZZAZIONE DI CHIUSURE VERTICALI OPACHE.

Relatore: Jean-Marc Tulliani

Candidata: Sara Mancuso

Correlatori: Marco Zerbinatti
Alberto Belli

a.a 2018-2019

ABSTRACT

Il 2019 è stato un anno contraddistinto dalle parole **sostenibilità, reimpiego, riciclo,** e tante altre keywords che si sono propagate grazie al recente impegno diffusosi verso i confronti dei problemi legati all'ambiente, all'inquinamento e al surriscaldamento globale. Il pianeta Terra ha iniziato a dimostrare la sua sofferenza e limitatezza dovuta a un cattivo atteggiamento e informazione posseduta dall'uomo, e ciò ha spinto molte persone, in modi e settori diversi ad interessarsi al tema della **sostenibilità**. In questo studio condotto ho voluto porre l'interesse maturato nel corso della magistrale in architettura per il progetto sostenibile, nei confronti dei materiali utilizzati. Durante gli atelier e corsi frequentati ho avuto modo di conoscere materiali e soluzioni tecnologiche utili alla buona formazione di una figura professionale come l'architetto, ma la notevole curiosità suscitata dal corso di scienza dei materiali, ha motivato questa sfida dove anzi di dedicarmi alla sola selezione di un prodotto presente in commercio utile alla realizzazione di un progetto, ho voluto toccare con mano la sua creazione cercando di non perdere la traiettoria sostenibile che mi ero preposta di perseguire. La finalità di questa tesi di ricerca è stata quella di pensare ad un rifiuto in modo differente, ovvero in modo sostenibile, andando a ritrovarne un nuovo impiego per quei prodotti destinati alla discarica una volta finito il loro ciclo di vita. Un'**economia circolare** atta a ridurre gli sprechi, in cui siamo partiti proprio dall'identificazione di un sottoprodotto caratterizzante l'economia nazionale italiana, ossia la produzione di pietre, dalla cui lavorazione viene generato e conseguentemente scartato un fango, denominato per l'appunto **fango di segagione.** Questo materiale, in passato veniva probabilmente scartato lungo i percorsi fluviali adiacenti alle cave di estrazione, o comunque nei pressi delle aree di lavoro e successivamente in seguito alle conoscenze e allo sviluppo è stato catalogato in quanto rifiuto speciale non pericoloso. Tutto ciò che è catalogato in quanto rifiuto ha un impatto sia a livello di discarica, e quindi corrette metodologie ed azioni volte al suo smaltimento, e sia a livello economico. I costi relativi allo smaltimento, a seconda della quantità di materiale soggetto a tale azione, posso avere dei valori esorbitanti. Da qui la sfida a realizzare un materiale sostituibile agli attuali prodotti venduti e utilizzati in campo edile, la volontà di concepirlo nella sua interezza e nelle fasi caratterizzanti il processo di realizzazione andando ad avvicinarmi a materie non propriamente affini alle mie attitudini per conoscerle e unirle alle mie skills, ultimando lo studio con l'esecuzione fisica del materiale e anche la progettazione della sua futura destinazione d'uso. L'iter di questa tesi cerca di non distaccarsi mai dall'approccio sostenibile, partendo dalle azioni svolte in laboratorio al fine di creare un materiale alcali-attivato, destinato alla realizzazione di elementi di chiusura verticale opachi, ovvero atto alla realizzazione di facciate, per sopperire da un lato a materiali attualmente utilizzati come il cemento e il cls la cui energia incorporata e emissione di CO^2 connessa alla loro produzione in quantità così grandi a livello mondiale, ha dei valori troppo alti e negativi per cui la figura del progettista è eticamente e a livello normativo obbligata, a prendere presa di coscienza e di posizione. D'altro canto, oltre all'obiettivo stesso della tesi, dovuto al reimpiego di un materiale come risorsa vi è anche un atteggiamento sostenibile nella ricerca di materiali ausiliari di supporto allo studio aventi le medesime caratteristiche. Ad esempio, essendo solamente il fango, non in grado di raggiungere nella miscela dei risultati a livello meccanico necessari al suo utilizzo finale, è stato miscelato a vari materiali di confronto prendendo come soluzione finale quella che mostrava meno criticità e processi meno energivori e dannosi per l'ambiente. Il blocco finale realizzato, partendo da un riferimento normato e utilizzato come un laterizio specifico presente in commercio vede il reimpiego di fango di segagione e cocciopesto, i materiali sono pensati in quanto derivati da altri processi di lavorazione e coerenti a quanto affermato.

INDICE

ABSTRACT

RICECA

1. LO SVILUPPO SOSTENIBILE 1
1.1 DEFINIZIONI DELLO SVILUPPO SOSTENIBILE 1
1.2 EVOLUZIONE DEFINIZIONE DI SOSTENIBILITA' 2
1.3 ARCHITETTURA E EDILIZIA SOSTENIBILI 5
1.4 L'IMPATTO DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE 6

2. I FANGHI DI SEGAGIONE 14
2.1 ESTRAZIONE DELLA PIETRA ORNAMENTALE 14
2.2 IL MERCATO LAPIDEO IN ITALIA E NEL MONDO 15
2.3 PRODUZIONE E COMPOSIZIONE DEI FANGHI DI SEGAGIONE 16
2.4 ATTUALE REIMPIEGO DEI FANGHI DI SEGAGIONE 18

3. I GEOPOLIMERI 22
3.1 CENNI STORICI 23
3.2 PREPARAZIONE 23
3.3 PROPRIETA' DEI GEOPOLIMERI 24
3.4 LE APPLICAZIONI 26
3.5 SOSTENIBILITA' AMBIENTALE DOVUTA DALL'USO DI GEOPOLIMERI 29
3.6 MATERIE PRIME 29
3.7 LIFE CYCLE ANALYSIS PER LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE DEI GEOPOLIMERI 31

1° FASE LAB.

4. L'ATTIVITA' IN LABORATORIO 38
4.1 RIFERIMENTI IN LETTERATURA 38
4.2 MIX-DESIGN 39
4.3 ANALISI EFFETTUATE 40
4.4 MATERIE PRIME 42
4.5 STRUMENTAZIONE DI LABORATORIO 44
4.6 PREPARAZIONE DELLE MATERIE PRIME 45
4.7 PREPARAZIONE DELLA MISCELA 46
4.8 PREPARAZIONE DEGLI STAMPI 53
4.9 PROVE E RISULTATI OTTENUTI 53

2° FASE LAB.

5. IL PRODOTTO FINALE 58
5.1 PROGETTAZIONE DELLO STAMPO E REALIZZAZIONE 58
5.2 ADATTAMENTO DELLA MISCELA 61
5.3 STRUMENTAZIONE DI LABORATORIO 62
5.4 PROVE E RISULTATI OTTENUTI 65

6. **CONCLUSIONI 74**

7. **ALLEGATI 75**
7.1 ESITI TEST MECCANICI 75
7.2 SCHEDA TECNICA POROTON 78

RINGRAZIAMENTI

1. LO SVILUPPO SOSTENIBILE

Parlare di sviluppo sostenibile in architettura significa cimentarsi in un argomento molto vasto, nel quale la costruzione è analizzata in tutte le sue forme, dalla progettazione, all'esecuzione dei lavori, la gestione e l'utilizzo, arrivando sino alla demolizione del manufatto edilizio stesso. Prendendo come esempio la progettazione completa di un edificio, al fine di perseguire in un ragionamento in linea con i concetti di sostenibilità, bisogna agire con questa logica nell'arco di tutto l'iter progettuale, e non solo in alcune scelte. Se parliamo di materiali da costruzione non basta scegliere un "materiale green"[1] bisogna preoccuparsi di ogni singola fase di vita di quest'ultimo, il trasporto (prediligere materiali autoctoni), la sua lavorazione, l'embodied energy[2] prodotta, la sua dismissione e/o possibile reimpiego. La sostenibilità si dirama anche in aspetti che interessano il vivere quotidiano, legati all'individuo e al suo benessere psicofisico sia in ambito familiare, che nella propria dimora, o nel luogo di lavoro e negli spostamenti generati dal vivere all'interno di una società.

1.1 DEFINIZIONI DELLO SVILUPPO SOSTENIBILE

La sostenibilità riguarda tre tematiche chiave intrinsecamente connesse fra loro, una è la sfera economica, dove compaiono tutti i costi effettuati durante un iter progettuale, costi di progettazione, di costruzione, di gestione, di demolizione e così via. Oltre a quella economica un'altra forma di sostenibilità è quella sociale, la quale vede come focus l'innalzamento della qualità di vita dell'individuo, evita il fenomeno dell'esclusione sociale attuando una democrazia partecipativa e un vivere insieme alla società non solo in senso fisico ma bensì decisionale. In ultimo vi è la sostenibilità ambientale, ovvero salvaguardare la sopravvivenza e l'utilizzo corretto del nostro habitat, la terra.

Figura 1.1, Schema autoprodotto sulle tematiche appartenenti alla definizione di Sostenibilità.

La scienza dell'ecologia rappresenta l'origine etimologica di suddetto termine, secondo un ecosistema la sostenibilità è una capacità, atta a mantenere inalterata nel tempo, le caratteristiche di biodiversità e produttività, tramite l'uso consapevole di risorse naturali affinché si possano rigenerare senza eccedere nelle capacità di carico dell'ecosistema stesso." *Lo sviluppo sostenibile è una forma di sviluppo di tipo olistico, che considera cioè un'ampia serie di ambiti e la totalità delle attività umane, con il proposito di non compromettere la possibilità delle future generazioni di perdurare nello sviluppo, preservando la qualità e la quantità del patrimonio e delle riserve naturali."* Esso comprende molti scenari, trai quali emergono:

- selezione accurata dei materiali e del loro reperimento
- energia consumata per il trasporto e successive lavorazioni del prodotto
- energia necessaria al corretto funzionamento
- azioni volte alla manutenzione nella fase di vita del prodotto(materiale)

[1] I materiali green sono quelli che agiscono in modo ecologicamente responsabile nei confronti dell'ambiente, rispettano l'uso dei materiali prodotti da fonti rinnovabili e un ciclo di utilizzo conservativo piuttosto che dissipativo.
[2] L'Embodied Energy è un indicatore dell'energia impiegata per la produzione di un materiale, dalla sua estrazione della materia prima, lavorazione, trasporto, uso e dismissione del materiale e componenti.

- durata globale degli insiemi (approvvigionamento, smaltimento e comunicazione)
- facilità nel riuso grazie a tecniche di smontaggio e riassemblaggio
- opportunità di trasformazione e riciclaggio, (approccio delle 3R[3])

1.2 EVOLUZIONE DEFINIZIONE DI SOSTENIBILITA'

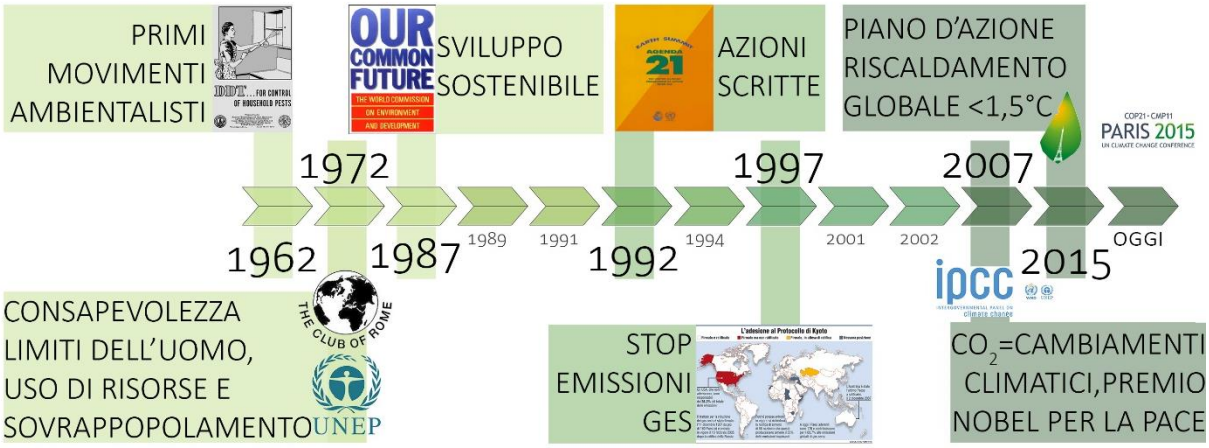


Figura 1.2, Time line autoprodotta sull'evoluzione di Sostenibilità.

Nel **1962**, Rachel Carson inizia a diffondere i concetti di sostenibilità attraverso un suo scritto del 1962, uscendo fuori di casa in primavera non udiva più il canto degli uccelli, dovuto ad un uso smodato di insetticidi per le coltivazioni. Il boom economico avvenuto dagli anni '60, prima in America per poi diffondersi in tutta Europa, genera grandi produzioni in cui l'uso di insetticidi è protagonista, andando ad intaccare l'intera catena alimentare. La Carson attacca il **DDT**[4], generando la propagazione di numerosi **movimenti ambientalisti**, esso venne scoperto nel 1939 da Paul Muller, chimico della Bayer, adoperato nella bonifica di aree paludose e per il debellamento della malaria, ma dagli anni '70/'80 viene bandito in tutta Europa compresa l'Italia nel 1978. Nel **1972** il Club di Roma, costituto da abitanti di tutti i paesi, preoccupati dell'incombente minaccia di una moltitudine di problemi che riguardano il genere umano, ha invitato il MIT[5], a editare un report finalizzato ad espletare i limiti fisici e le costrizioni inerenti alla continua crescita del genere umano e alla sua attività materiale sulla terra. Le conclusioni di questo elaborato evidenziano che l'umanità non può permettersi di proliferare con questo ritmo crescente e costante, non può perdurare nelle sue azioni materiali senza imbattersi nei limiti naturali del processo, un duplice scontro in cui può accettare le disastrose conseguenze di questo processo oppure affrontare in modo differente e consapevole, nuove strade padroneggiando il futuro dell'essere vivente. In seguito a questa presa di coscienza sull'utilizzo umano di risorse naturali e sulla crescita incontrollata degli abitanti di un pianeta considerato erroneamente dalle risorse illimitate, troviamo sempre nel 1972 un altro importante avvenimento, il quale contribuisce nella scansione temporale della definizione di sviluppo sostenibile. La dichiarazione sull'ambiente umano è stata approvata dalle 110 delegazioni partecipanti alla conferenza dell'ONU tenutasi a Stoccolma, in cui si afferma che l'azione dell'uomo, con il conseguente impatto sull'ambiente, deve essere condotta in modo più consapevole e responsabile, *"uno scopo imperativo per tutta l'umanità"* da raggiungere insieme agli obiettivi di pace e sviluppo economico/sociale a livello mondiale. Le tematiche suddivise nei 26 punti della suddetta dichiarazione, la crisi del petrolio, il controllo e la protezione dell'ambiente naturale, la nascita di Earthwatch[6] e il programma

[3] 3R, ridurre riutilizzare e riciclare in architettura.
[4] DDT, DICLORO DIFENILE TRICLOROETANO, un POP (PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS), sostanze di sintesi durevoli alla decomposizione, alcune delle quali possiedono caratteristiche tossiche. Nocive all'uomo e al suo habitat, si accumulano negli organismi, nell' aria, nell' acqua, possono essere anche mortali per la fauna.
[5] MIT, Massachusetts Institute of Technology, una delle università più note per la ricerca nel mondo.

ambientale delle nazioni unite[7] fanno parte dello scenario mondiale di questi anni. Arriviamo al **1987** con la stesura di una delle definizioni maggiormente conosciute, "La sostenibilità richiede un equilibrio fra il soddisfacimento delle esigenze presenti e la possibilità delle future generazioni di sopperire alle proprie". Gro Harlem Brundtland, presidente all'epoca della Commissione mondiale su Ambiente e Sviluppo, istituita nel 1983, realizzò il rapporto «Our common future», organizzando i concetti base da seguire per questo tipo di sviluppo. In questo scritto si evidenziano le criticità e difficoltà dovute a una differenza economica netta tra il Sud e i modelli di produzione e consumo del Nord, molto lontani dall'appellativo sostenibile, e la soluzione si riassume in una nuova strategia da applicare, definita dal termine inglese «**sustainable development**» e successivamente tradotto. Alla fine degli anni '80, Karl Henrik Robert definisce in modo sistemico globale ed operativo, i principi i quali invocheranno la sensibilizzazione sulle tematiche dello sviluppo sostenibile e ciò che quest'ultimo comporta realmente. Nel **1987** attraverso il protocollo di Montreal si classificano i gas dannosi per l'ozono stratosferico. L'ozono protegge l'uomo dai raggi UVB, i quali sono molto dannosi per la nostra salute, i CFC[9] sono i responsabili principali di questa grandissima problematica e verranno in seguito sostituiti dagli HCFC, idro cloro fluoro carburi, anche questi ultimi spariranno entro il 2030. Nel **1989**, in seguito ad un successo raggiunto attuando un processo di costruzione del consenso scientifico, egli dà vita a un'organizzazione di consulenza no profit, "The natural step" ed a un "FSSD"[8], ovvero un framework di sviluppo sostenibile strategico che rapidamente si è diffuso e attivato nei board di aziende e sale del governo. Qualche anno dopo, nel **1991**, vi è una nuova definizione *"un miglioramento della qualità della vita, senza eccedere la capacità di carico degli ecosistemi di supporto, dai quali essa dipende"* ad opera di WCU, UNEP e WWF[10]. Nello stesso anno, l'economista ambientale Herman Daly introdusse il principio di equilibrio tra uomo ed ecosistema, in cui si possono evidenziare in particolar modo i seguenti punti; la quantità di materie e risorse rinnovabili utilizzate per il soddisfacimento del fabbisogno umano non può essere maggiore del grado di rigenerazione della risorsa stessa. Il medesimo ragionamento è stato anche descritto per controllare l'immissione di sostanze inquinanti per l'ambiente e l'uomo stesso, scorie, le quali non devono essere emesse in quantità maggiori rispetto alla capacità di carico dell'ecosistema. Infine, lo stock delle risorse non rinnovabili deve essere organizzato in modo tale da rimanere costante nel tempo. Nel 1992, dopo due decadi da quando si erano riuniti scienziati e professionisti di tutto il mondo per risolvere le problematiche concerni alla sostenibilità ambientale, si riuniscono nuovamente definendo una nuova terminologia e constatando che il modello capitalistico dell'epoca riscontrasse già allora i caratteri di non sostenibilità, che in alcuni contesti e azioni si possono riscontare al giorno d'oggi.

IMPATTO AMBIENTALE:

Popolazione umana x N° di beni consumati pro-capite x Necessità di materiali x Energia per bene prodotto

Nel **1992** vi è il summit della terra di Rio, in cui più di 170 governi si riuniscono per discutere sull'ambiente, sulle foreste, sulla biodiversità. Tale conferenza si conclude con la stesura di numerosi documenti ufficiali, tra i quali:

- Dichiarazione di Rio sull'ambiente e sullo sviluppo;
- Agenda 21;

[6] Earthwatch, ente benefico internazionale la cui missione è quella di coinvolgere l'essere umano di tutto il pianeta nella ricerca scientifica sul campo, e in una pratica educativa che promuova la comprensione e le azioni corrette e necessarie per un vivere in modo sostenibile.

[7] UNEP, un'organizzazione internazionale che opera dal 1972 contro i cambiamenti climatici a favore della tutela dell'ambiente e dell'uso sostenibile delle risorse naturali.

[8] FSSD, framework for strategic sustainable developement, noto anche come the natural step framework, la prima azienda ad adottarlo è stata l'IKEA nel 1990.

[9] CFC, cloro fluoro carburi, gas utilizzati negli impianti refrigeranti e nella climatizzazione.

[10] World Conservation Union (WCU), UN Environment Programme (UNEP) e World WideFund for Nature (WWF).

- Convenzione sulla differenza biologica;
- Principi sulle foreste;
- Convenzione quadro sulle nazioni unite sul cambiamento climatico.

Il capitolo 28 dell'Agenda 21 rappresenta uno dei documenti di maggiore importanza poiché vengono sottoscritte le **azioni** da compiere nel XXI secolo, **per realizzare uno sviluppo sostenibile,** invitando e includendo le autorità locali a giocare un ruolo chiave nella promozione di tale sviluppo. Nel **1994,** si attuano le proposte di Rio attraverso la stesura della carta di Aalborg, prima conferenza europea sulle città sostenibili, organizzata dal consiglio internazionale per le iniziative ambientali locali (ICLEI). Con questo testo si attua l'inizio della "campagna europea sulle città sostenibili" e si formalizzano i concetti di partecipazione e buona governance del territorio; le città, i territori europei si impegnano formalmente ad attuare l'agenda 21° a livello locale, elaborando piani a lungo termine per uno sviluppo che si protrae nel tempo, avviando una campagna di sensibilizzazione. Si articola essenzialmente in tre sezioni:

- Dichiarazione di principio, le città europee per un modello urbano sostenibile;
- Campagna delle città europee sostenibili;
- L'impegno del processo di attuazione dell'Agenda 21 a livello locale.

Nel **1997,** si ha il trattato di Kyoto, documento internazionale, il quale stabilisce determinate condizioni per i **tagli delle emissioni di GES**, gas responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento globale. Venne sottoscritto da più di 160 paesi, in occasione della conferenza COP3, della convenzione quadro delle nazioni unite sui cambiamenti climatici. Il trattato prevedeva l'obbligo assoluto per i paesi industrializzati di raggiungere una drastica riduzione delle emissioni di inquinanti, nel periodo 2008 – 2012, in una misura non inferiore al 5,2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990 (considerato come anno base), 118 paesi si attivarono e impegnarono nel farlo, mentre Gli Stati Uniti d'America, essendo anche tra i maggiori produttori di GES, non collaborarono nell'impegno, entrerà in vigore ufficialmente solo nel 2005.
Nel **2001**, in occasione della trentunesima sessione della Conferenza Generale dell'UNESCO, tenuta a Parigi, si adotta all'unanimità la dichiarazione universale sulla differenza culturale, quest'ultima diverrà il quarto pilastro fondamentale della precedente triade utilizzata per la definizione del termine sostenibilità sociale, economica e ambientale. Così come si evince dall'articolo uno di suddetta dichiarazione, la cultura sì è diffusa nei luoghi e nelle epoche in modo e con un ritmo dissimile, i suoi attori, ovvero gli individui di una società hanno dimostrato la propria diversità, con azioni più originali, attraverso una moltitudine di personalità, le quali si sono rivelate essenziali per l'umanità stessa, per l'innovazione, la crescita, la creatività, divenendo patrimonio anche delle generazioni future.
Nel **2002,** si tiene il vertice mondiale sullo sviluppo sostenibile a Johannesburg (WSSD, Sud Africa) delle Nazioni Unite con l'adesione di 189 dei 195 Stati membri dell'ONU, di numerosi capi di Stato e di Governo, dei rappresentanti delle Organizzazioni Non Governative (ONG), del settore privato e di altri gruppi di interesse. L'obiettivo dell'incontro era far riflettere su tematiche trattate già dieci anni prima durante il summit di Rio, al fine di raggiungere uno sviluppo sostenibile:

- adottare una politica d'azione sottoscritta e riconosciuta da tutti gli stati presenti;
- realizzare collaborazioni e condivisioni di progetti e azioni tra gli stati aderenti, in modo volontario e al fine di rendere più concreto l'obiettivo da perseguire;
- rinnovare l'impegno dei leader mondiali nei confronti della lotta alla povertà attraverso uno sviluppo economico epurato dal consumo esagerato di risorse e degrado ambientale.

Nel **2007,** il quarto rapporto dell'IPCC [11], stabilisce la **correlazione tra i valori di CO_2** presenti in atmosfera e i **cambiamenti climatici**. All'interno del rapporto vennero richiamati oltre 6000 articoli scientifici e venne controllato e revisionato da 625 esperti prima di essere pubblicato, sempre nello stesso anno, l'IPPC riceve il premio Nobel per la pace.
Nel **2015,** la COP21 rappresenta la conferenza sul clima tenuta a Parigi, nella quale 195 paesi si sono impegnati

[11] IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change, il maggiore organismo internazionale per il controllo del cambiamento climatico.

a sottostare al primo accordo universale e giuridicamente vincolante in merito al clima mondiale. Il piano d'azione definito da tale accordo prevede di limitare e contenere il riscaldamento al di sotto dei 2°C, punta a modificare quest'ultimo numero raggiungendo un limite non superiore ai 1,5°C. I governi aderenti hanno preso posizione dichiarando di riunirsi periodicamente ogni cinque anni in modo da concordare obiettivi più lungimiranti, e pubblicando i risultati delle loro azioni a tutti e divulgando sempre di più questo concetto essenziale alla vita umana. L'accordo prevedeva l'adesione di almeno 55 paesi per entrare in vigore, i quali rappresentavano il 55 % delle emissioni globali, nel novembre 2016 l'UE lo ratifica formalmente. Nelle successive conferenze che si sono tenute sino ad oggi, in particolare l'ultimo Summit tenuto a Bruxelles nel giugno 2019, l'obiettivo proposto dalla commissione europea per un raggiungimento a zero emissioni entro il 2050, ha ricevuto il veto da Polonia, Ungheria, Estonia e Repubblica Ceca, gli stati del blocco di Visegrad, tra quest'ultimi la Polonia trae l'energia prevalentemente dal carbone. A settembre e novembre del 2019 si avranno nuove novità sugli accordi finora argomentati, ma il futuro dell'umanità rimane per il momento in bilico, tra incedi distruttivi, alluvioni, scomparsa delle stagioni, inquinamento, deforestazioni, aumento delle temperature…
Questo elenco sopracitato sull'evoluzione negli anni del termine sostenibilità e di tutti gli interventi internazionali che si sono susseguiti, è atto a donare una coscienza critica alle persone a tutti gli esseri umani, poiché il cambiamento climatico non è una moda degli ultimi tempi , non è puro allarmismo, manipolazione o propaganda mediatica, è purtroppo il risultato delle sbagliate azioni svolte sino ad adesso, all'eccesso di utilizzo delle risorse, e così via; bisogna informare e prendere coscienza sull'argomento e su come comportarsi anche nella vita quotidiana poiché stiamo raggiungendo e varcando un limite senza ritorno.

1.3 ARCHITETTURA E EDILIZIA SOSTENIBILI

Le suddette definizioni introducono anche il significato in un edificio sostenibile, ovvero, *"sistema in grado di mantenere costanti le proprie prestazioni nel tempo con un ridotto consumo energetico e di materiali"*.
Anche per la progettazione e realizzazione di un manufatto architettonico, dobbiamo parlare di sostenibilità, e anche in questo contesto il termine possiede innumerevoli sfaccettature, tra le quali:

- Aspetti legati all'ambiente;
- Efficienza energetica;
- Consumo e riutilizzo di acqua;
- Qualità della vita degli occupanti, attenzione negli agenti inquinanti outdoor e indoor, a quelli che si immettono attraverso l'arredo, utilizzo di determinati materiali, vernici...
- Durabilità;
- Analisi dei costi e dei benefici;
- Materiali da costruzione;
- Analisi del ciclo di vita degli elementi.

Molti termini si stanno diffondendo e vengono utilizzati per definire studi/scienze in realtà tra loro differenti, accomunate tendenzialmente solo dall'esecuzione architettonica, verso un aspetto comune di sostenibilità. Si parla di architettura ecologica, il termine di provenienza anglosassone, fa riferimento all'architettura "ambientalmente responsabile", successivamente alle direttive del '92 nella conferenza dell'ONU sullo Sviluppo Sostenibile, il termine architettura ecologica deve essere reintegrato dall'accezione "attività costruttiva sostenibile", dove le tematiche principali appaiono:

- Inquinamento Indoor;
- Ciclo di vita dei materiali e dei componenti;
- Comportamento energetico degli edifici e soluzioni tecnologiche;
- Valutazione eco-economica delle varie fasi del processo e del suo impatto sull'ambiente;
- Riuso e riciclaggio dei materiali;
- Ricerca di materiali e soluzioni alternative rispetto sostanze rivelatesi dannose per la salute e per l'ambiente.

Fino ad un secolo fa erano gli impianti a dover assolvere alle esigenze atte a favorire il benessere all'interno di un ambiente, che gli edifici potessero essere costruiti nel medesimo modo e con gli stessi materiali in qualunque posto senza aver cura delle condizioni climatiche circostanti. La crisi energetica degli anni '70, ha modificato questo concetto correlando il fattore climatico e ambientale alla soluzione tecnologica adottata. Si parla di **architettura bioclimatica**, per indicare lo studio delle soluzioni tipologiche e dei sistemi tecnologici e loro relativa efficienza, rispetto al luogo di interesse, al contesto climatico e ambientale che permette di raggiungere il benessere all'interno degli edifici. Si parla di **bioedilizia**, per indicare il "costruire biologico", termine tedesco adoperato dall'Istituto Indipendente di ricerca fondato nel 1976. Abitualmente utilizzato per descrivere materiali, processi e metodi edilizi rispettosi della salute dell'utente, solitamente materiali naturali a basso impatto ambientale e di origine naturale. L'idea biologica si contraddistingue per aver attribuito alla progettazione una visione antropologica, in cui l'uomo e il suo benessere all'interno dell'habitat, dimora, luogo di lavoro, svago, sia di primaria importanza rispetto ad altre esigenze e caratteristiche da controllare ed eseguire all'interno di un progetto. Sebbene fisico il benessere deve essere anche psichico, in armonia ed equilibrio alle abitazioni e ai luoghi (elettromagnetismo, elettrosmog, emissioni nocive VOC e POP, forma e disposizione degli spazi, luce naturale, colori, simboli e significati). Si determina in questo modo una manualistica di tipo prescrittivo, ricca di contenuti scrupolosi per la scelta dai materiali da utilizzare o ancor meglio reimpiegare e la determinazione delle tecnologie maggiormente biocompatibili. Quella delineate da dieci principi guida è invece **l'architettura sostenibile,** i cui principi hanno l'obiettivo di guidare le scelte normative regionali o locali e di indirizzare tutti gli enti verso una programmazione consona alle nuove politiche sull'edilizia. Tali principii sono priorità strategiche per raggiungere tali scopi specifici:

- Ricercare uno sviluppo armonioso e sostenibile dell'habitat umano, del tessuto urbano e dell'intervento edilizio;
- Tutelare l'identità storica delle città e contribuire favorendo il mantenimento della memoria storica e tipologica legata alla tradizione degli edifici;
- Contribuire con azioni e misure volte al risparmio energetico e all'utilizzo di fonti rinnovabili;
- Costruire in modo sicuro e salubre;
- Ricercare e applicare costantemente tecnologie edilizie sostenibili, sotto il profilo ambientale, economico e sociale;
- Utilizzare materiali di qualità certificata ed ecocompatibili;
- Progettare soluzioni differenziate per rispondere alle molteplici richieste di qualità dell'abitare;
- Garantire gli aspetti di safety e security dell'edificio;
- Applicare la domotica per lo sviluppo di una nuova qualità dell'abitare;
- Promuovere la formazione professionale, la progettazione partecipata e assunzione di scelte consapevoli nell'attività edilizia.

1.4 L'IMPATTO DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Il professionista svolge un ruolo essenziale e deve essere una figura competente anche nella scienza dei materiali poiché a differenza di come si può pensare, l'impatto che hanno gli edifici e tutte le opere edilizie sull'ambiente è abbastanza influente a livello globale. Circa il 10% dell'economia mondiale è occupato dagli edifici, dalla loro costruzione, manutenzione, funzionamento, arredamento. Per quanto concerne al consumo di risorse e materie prime, possiamo attribuire 1/6 del prelievo di acque dolci mondiale, 1/4 del raccolto globale di legname, 2/5 del flusso totale di materiali ed energia; dunque un enorme consumo di risorse, infatti ogni anno 3 miliardi di tonnellate di materie prime vengono trasformati e lavorati nella produzione edilizia. I consumi sono tanti e diversi, consumo energia, controllo di inquinamento di aria e acqua, aumento del costo di materiali le cui materie prime scarseggiano e sono poche o difficilmente reperibili, necessità di manutenzione, demolizione, sostituzione. La costruzione diviene sostenibile allorquando i materiali utilizzati

minimizzano l'uso delle risorse naturali, sono durevoli e riutilizzabili; nella loro scelta bisogna seguire alcune indicazioni:

- Riuso, "vuoto a rendere";
- Materiali con contenuto in parte o totalmente riciclato, in modo tale che non finisca in discarica o non debba essere smaltito, limitando di conseguenza il consumo di materie prime;
- Impiego di materiali rinnovabili, sostituibili nell'arco di alcune decadi dopo il raccolto;
- Impiego di materiali autoctoni, a ridotta energia incorporata, con riduzione del trasporto in situ;
- Impiego di materiali localmente adeguati, considerare il contesto climatico e tutti gli aspetti che influenzano direttamente l'area di interesse.

PRODUZIONE DI RIFIUTI ANALIZZATI DALLA SCALA NAZIONALE A QUELLA GLOBALE:

Dati di Sintesi | Dati di Dettaglio

Area Geografica	Popolazione	Raccolta Differenziata (t)	Rifiuti Urbani (t)	RD (%)	RD pro capite (kg/ab. anno)	RU pro capite (kg/ab. anno)
NORD	27.736.158	9.236.678,660	13.955.436,096	66,19 %	333,02	503,15
CENTRO	12.050.054	3.357.722,836	6.473.501,742	51,87 %	278,65	537,22
SUD	20.697.761	3.831.641,895	9.144.509,038	41,90 %	185,12	441,81
ITALIA	60.483.973	16.426.043,391	29.573.446,875	55,54 %	271,58	488,95

Tabella 1

Dati di Sintesi | Dati di Dettaglio

Frazione Merceologica	NORD (tonnellate)	CENTRO (tonnellate)	SUD (tonnellate)	ITALIA (tonnellate)
Frazione Organica	3.531.606,415	1.375.884,022	1.714.462,833	6.621.953,270
Ingombranti misti	464.281,826	124.006,017	184.768,493	773.056,336
Carta e cartone	1.731.387,944	798.437,394	747.285,019	3.277.110,356
Altro RD	109.080,384	69.500,953	66.757,984	245.339,320
Legno	592.610,976	128.827,484	78.937,672	800.376,132
Metallo	205.342,729	57.255,923	54.237,331	316.835,982
Plastica	726.551,355	206.769,124	340.334,267	1.273.654,745
RAEE	138.963,290	50.266,685	51.049,152	240.279,126
Selettiva	32.460,150	8.251,517	5.729,511	46.441,178
Tessili	74.001,889	22.541,291	36.848,886	133.392,066
Vetro	1.122.722,035	417.350,686	460.311,045	2.000.383,766
Rifiuti da C&D	270.275,497	64.557,090	51.103,974	385.936,561
Pulizia stradale a recup.	237.394,171	34.074,652	39.815,730	311.284,553
TOTALE RD	9.236.678,660	3.357.722,836	3.831.641,895	16.426.043,391
Ingombranti a smaltimento	74.496,165	31.107,131	26.061,815	131.665,110
Rifiuti Indifferenziati e Spazzamento	4.644.261,271	3.084.671,775	5.286.805,328	13.015.738,374
TOTALE RU	13.955.436,096	6.473.501,742	9.144.509,038	29.573.446,875

Tabella 2, Produzione e raccolta rifiuti in Italia nel 2017, fonte ISPRA.

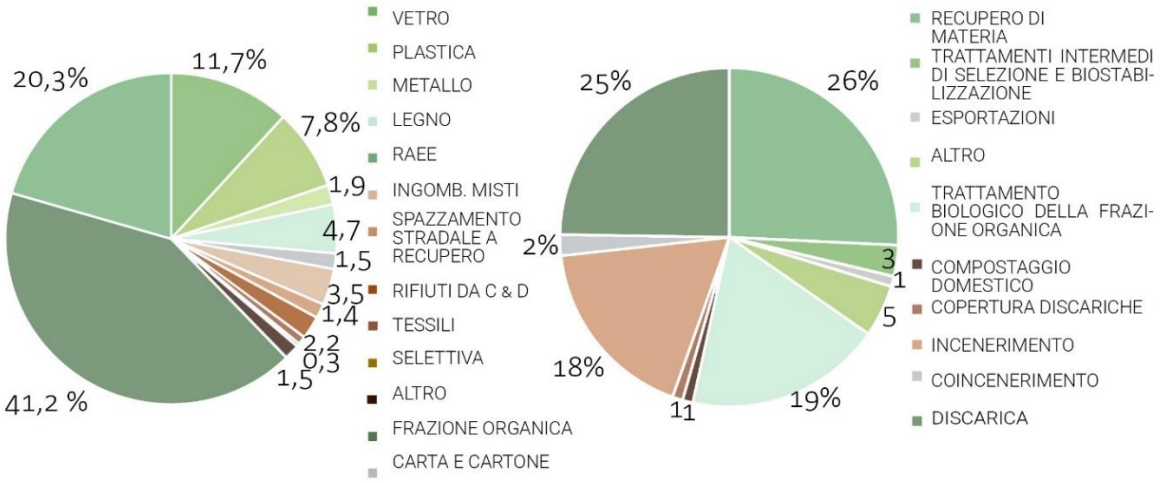


Figura 1.3, sulla sinistra ripartizione percentuale della raccolta differenziata anno 2016; sulla destra ripartizione percentuale della gestione dei rifiuti urbani anno 2016, grafici personalmente rielaborati, fonte ISPRA.

Come prima osservazione si può notare che il 55,54 % dei rifiuti prodotti in Italia sia di tipo differenziato, in seconda analisi i rifiuti prodotti da costruzione e demolizione (C & D) incidono del 2,4% sul totale dei rifiuti differenziati (RD) e l'1,3 % rispetto i rifiuti urbani (RU). Nei diagrammi a torta invece si può vedere come il trattamento dei rifiuti sia anch'esso in una condizione di mezzo per circa la metà recupero di materia e trattamento biologico della frazione organica, mentre l'altra metà si divide tra la discarica e l'incenerimento, due metodologie di smaltimento rifiuti da cui allontanarsi il più presto possibile.

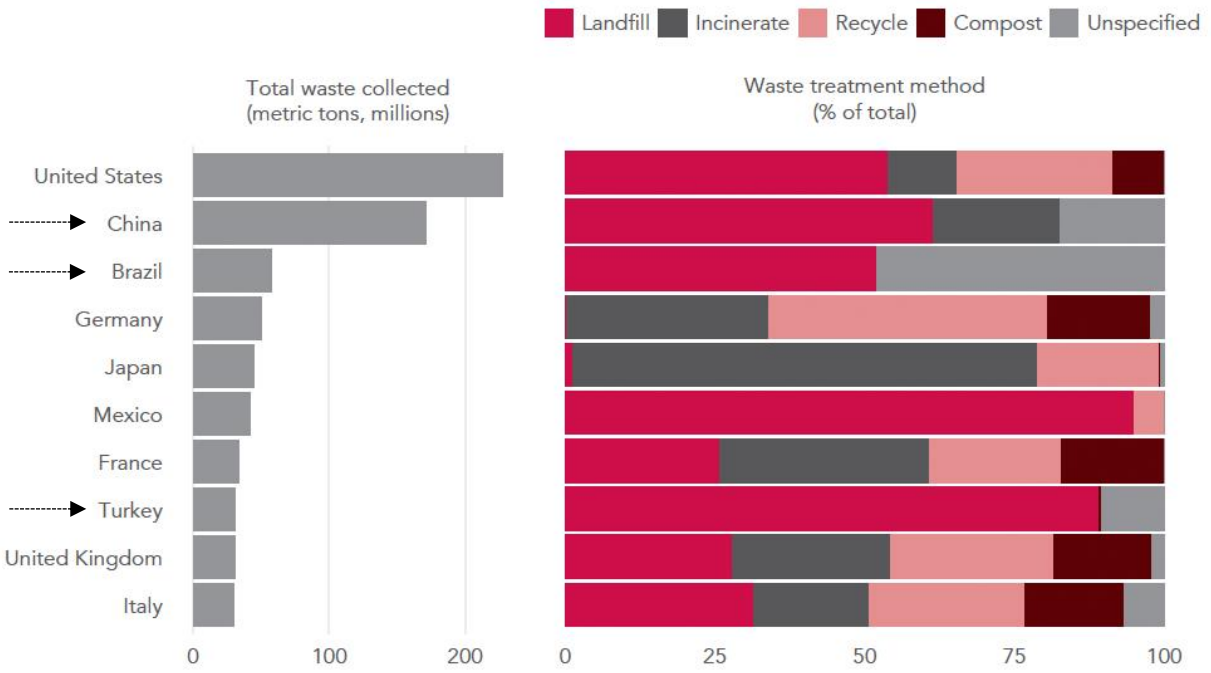


Figura 1.4, Gli U.S.A e la China collezionano il primato sulla produzione di rifiuti urbani, di cui la maggior parte viene smaltita tramite discarica, analisi effettuata dal 2012 al 2014, fonte The World Bank.

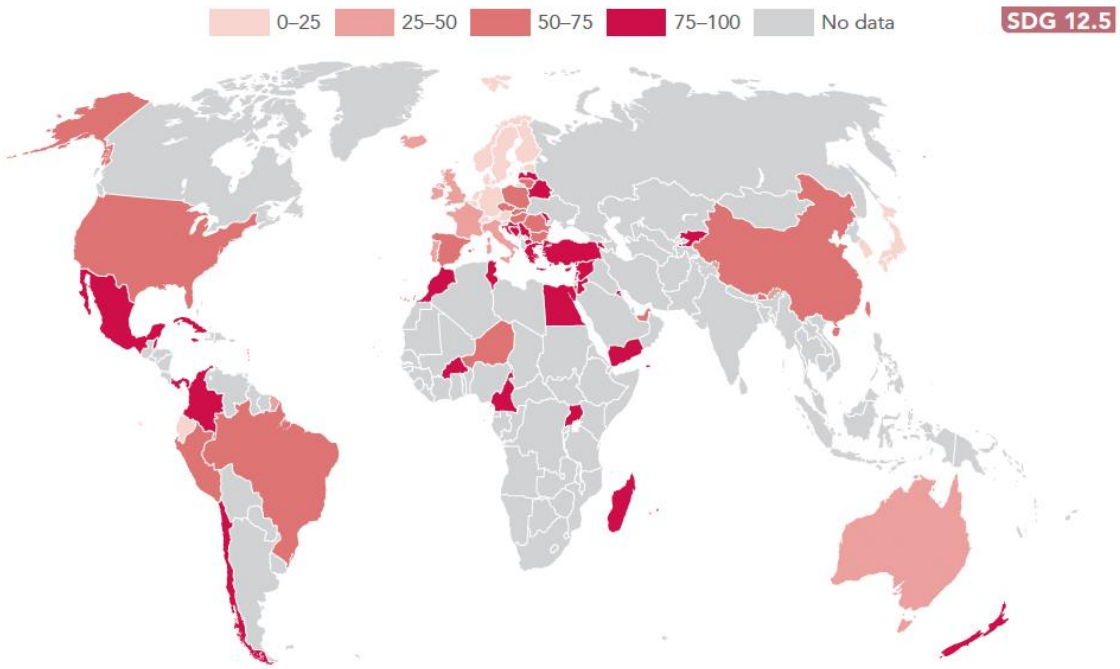


Figura 1.5, in due/ tre nazioni per le quali vi sono i dati statistici, oltre il 50% dei rifiuti urbani viene smaltito tramite discarica. Queste statistiche sono comunque in via di sviluppo per molte nazioni, fonte The World Bank.

Dall'Italia passiamo a una visione più ampia, andando ad analizzare a scala mondiale; l'istogramma mostra come gli Stati Uniti siano i primi produttori di rifiuti a livello globale, di cui un' altissima percentuale viene smaltita attraverso la discarica, ma la cosa più preoccupante che si evidenzia subito nella lettura del grafico è che altri grandi produttori di rifiuti come la Cina, detentrice del secondo posto, il Brasile e la Turchia, non abbiano nessuna percentuale di riciclo nella gestione dello smaltimento dei rifiuti.

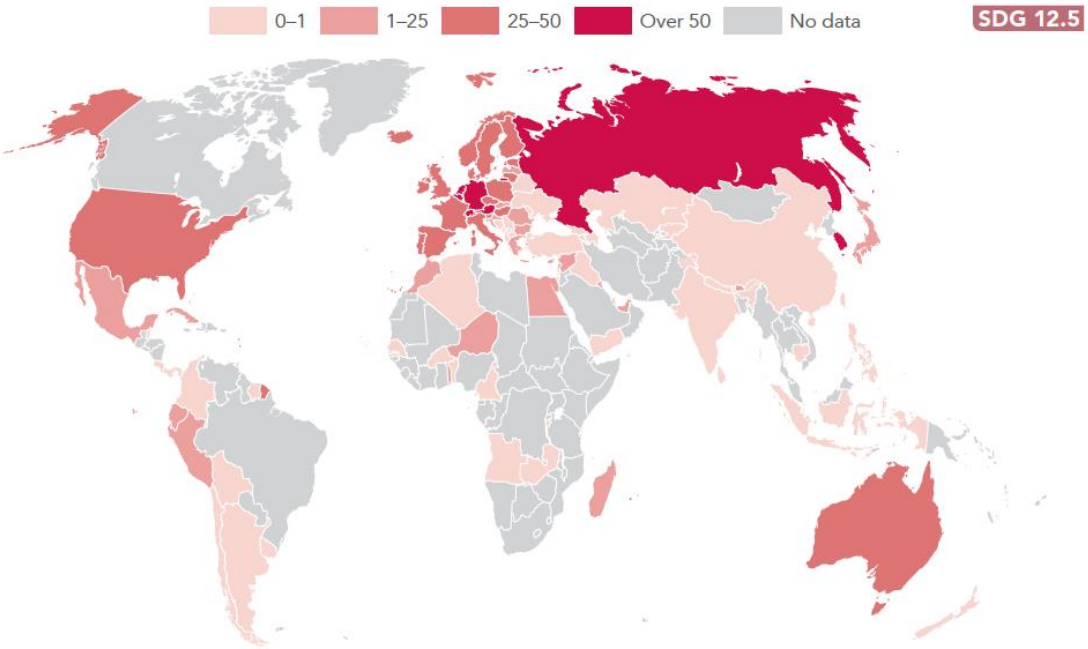


Figura 1.6, solamente 1 nazione su 10 smaltisce il 50 % dei rifiuti per via del riciclo o del compostaggio, fonte The World Bank.

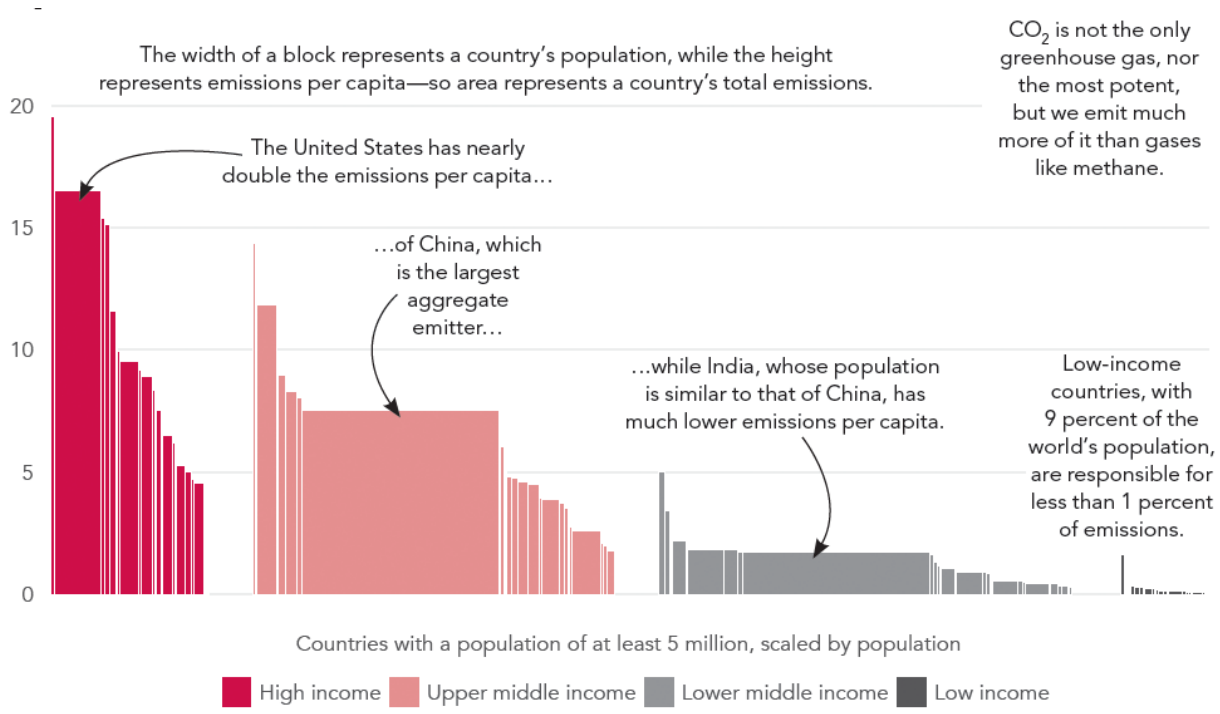


Figura 1.7, il cambiamento climatico è causato dalla presenza in atmosfera di CO_2 e dei GES, l'emissione pro capite varia in base allo status sociale economico, 2014 (metric tons pro capita), fonte The World Bank.

Il colore predominante nella Fig. 1.4, ci mostra come la tonalità rappresentativa del 1% di smaltimento di rifiuti via riciclo o compostaggio, sia prevalente rispetto le altre tonalità di colori. Il grigio è un altro colore predominante, caratteristica negativa poiché quest'ultimo indica luoghi di cui non abbiamo conoscenze e dati sui processi di gestione dei rifiuti. Nell'istogramma sottostante invece in Fig. 1.7, si vede come gli Stati Uniti producano il doppio delle emissioni rispetto la popolazione stessa, si può leggere la diretta proporzionalità tra le due varianti base ovvero status economico ed emissione prodotta. Se le grandi potenze, i maggiori produttori di emissioni e primi artefici del cambiamento climatico non iniziano a adottare politiche trasparenti e rispettose della sopravvivenza dell'umanità stessa, il lavoro del singolo nei confronti dell'ambiente risulterà inutile. Per quanto concerne il campo dell'edilizia e delle costruzioni l'impiego di materiali riciclabili diviene strategia di notevole risparmio energivoro, economico e a basso impatto ambientale. Quelli maggiormente usati in edilizia, posso essere riciclati e riutilizzati se si posseggono le conoscenze adeguate. Ovviamente non tutti i materiali possono essere riciclati, poiché magari hanno subito determinati processi durante la lavorazione del prodotto finale, partiamo dai metalli, i quali vengono largamente utilizzati nelle costruzioni a secco, o comunque nelle strutture metalliche. Questo materiale è riciclabile se i due elementi principali che lo compongono, alluminio e rame (Al, Cu) sono separati. Dato molto significativo, quello del riciclo dell'acciaio, il quale riduce del 50-70 % l'utilizzo di energia e la produzione d'inquinamento derivanti dalla sua normale produzione. Dato ancor più ragguardevole è quello che interessa la rifusione dell'alluminio, con una percentuale del 85% di energia risparmiata. Oggigiorno il 48% di Al presente sul mercato proviene dal riciclo.

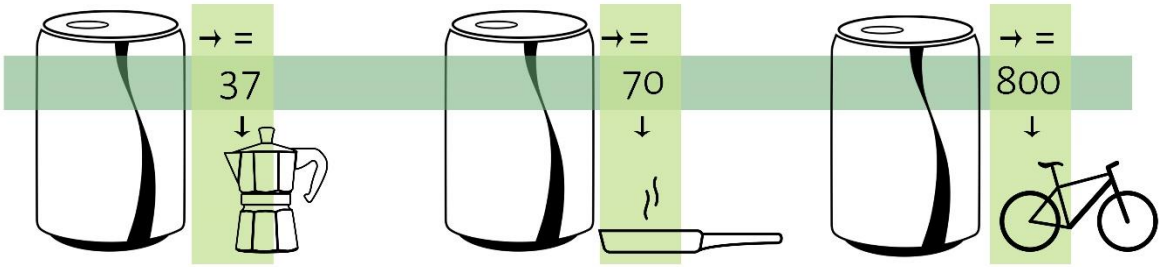


Figura 1.8, schema sul riciclo di lattine in alluminio con risultato dei prodotti che posso ottenere, rielaborazione autoprodotta su dati.

Un altro materiale molto utilizzato, non solo nell'edilizia ma purtroppo nella vita quotidiana, è la Plastica, la quale risulta riciclabile nella maggior parte dei casi, sebbene vi siano limitazioni dovute dalla difficile separazione dei vari tipi di materiale plastico. Questo materiale può essere riusato come materia prima secondaria (MPS) ottenendo in tal modo profilati, tubi, vasi, telai, innaffiatoi, e materiale di questo genere; oppure questo materiale può essere scomposto nei suoi componenti gassosi per produrre metano o gas di sintesi, in alternativa viene bruciato negli inceneritori, dove grazie alla reazione esotermica recupera il potenziale termico, risparmiando il petrolio o gli altri combustibili fossili utilizzati nella lavorazione. Anche il vetro che rappresenta un altro materiale molto utilizzato in edilizia per interno ed esterno, può essere riciclato se correttamente separato ed incontaminato. Per quanto riguarda il dispendio energetico non vi è chissà quale cambiamento, nondimeno si salvaguardia la materia prima stessa. L'usatissimo e pregiato legno massiccio non è di meno, è anch'esso riciclabile se sottoposto a nuove operazioni di segatura. La categoria composta dai calcestruzzi, dall'argilla e i **vari prodotti per muratura è difficilmente riciclabile**, parliamo proprio dei rifiuti da costruzione e demolizione che abbiamo ritrovato nelle tabelle precedenti, quei rifiuti che contribuiscono alle spese di gestione e conseguente produzione di CO_2 e inquinamento per il suo smaltimento. Il problema dello smaltimento di questa tipologia di rifiuti è proprio quello di essere costituiti da più componenti che non possono subire gli stessi processi di lavorazione, nel caso in cui vengono ridotti in frammenti, posso essere riusati come riempimenti granulari ad esempio per i sottofondi stradali. Infine, un altro materiale utilizzato nella costruzione è la pietra, riutilizzabile qualvolta venga frantumata e ridotta in ghiaia.
I materiali usati nella costruzione sono ormai infiniti e l'impatto che hanno sul nostro habitat è davvero tanto,

già nel 1997 si parla del settimo continente di plastica scoperto da Charles Moore a bordo del suo catamarano. I dati sulla plastica sono sempre più inquietanti:

- Oltre l'80% dei rifiuti di plastica finisce negli oceani;
- I rifiuti si appesantiscono stando nell'acqua e si abissano con il tempo;
- Parte dei rifiuti si frammenta sotto l'azione potente dei raggi UV, dell'acqua e degli agenti atmosferici;
- I polimeri integrano, mutano, distruggono la catena alimentare poiché tutta la fauna marina li ingerisce;
- 35% dei pesci pescati nel Nord Pacifico hanno ingerito delle plastiche.

Un elenco che può andare avanti a oltranza, ma che invece bisogna cessare di allungare.

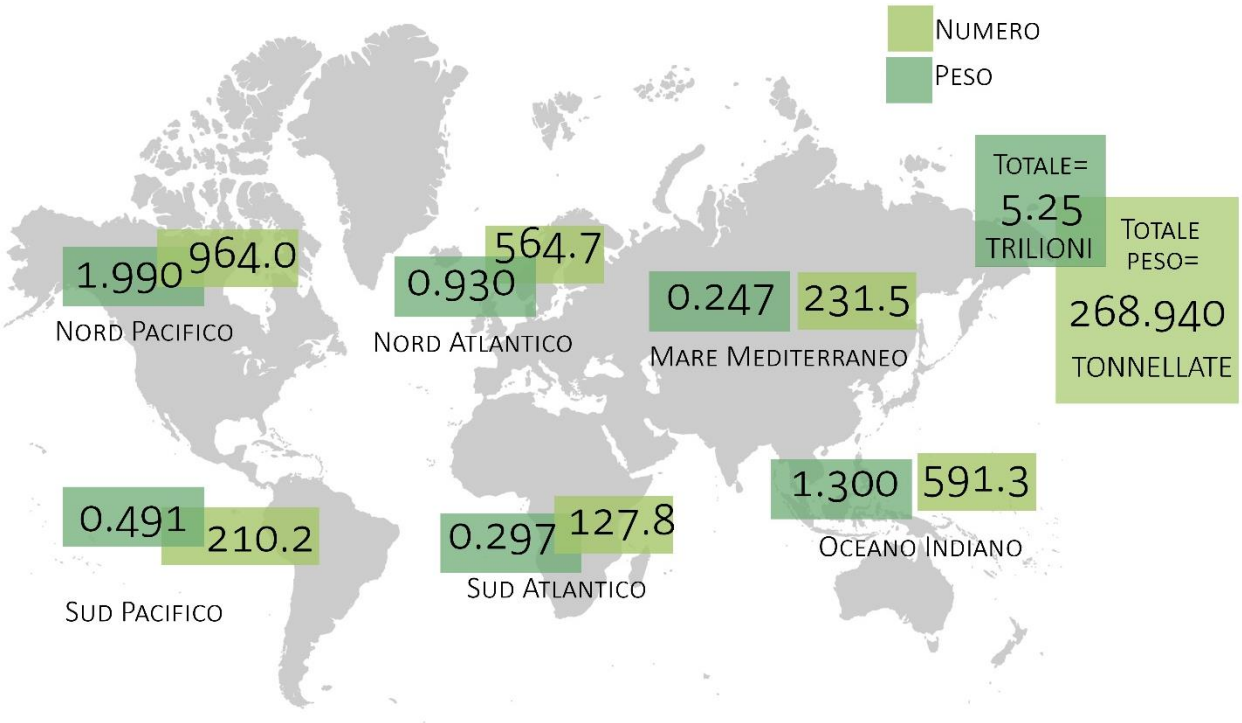


Figura 1.9, gli oceani del mondo sono infestati dalla plastica, numero e peso dei pezzi di plastica che galleggiano nel mare, fonte statista, immagine autoprodotta.

Figura 1.10, l'onda montante delle bottiglie di plastica in Italia. **Figura 1.11,** principali obiettivi delle costruzioni sostenibili.

Le immagini mostrate indicano quanto sia rilevante e assurda la presenza di plastica nelle acque dei nostri mari, il diagramma in Fig. 1.10, ci mostra quali siano i dati delle bottigliette di plastica che risultano essere i maggiori rifiuti di plastica prodotti, che emissioni genera la loro produzione e il loro trasporto proprio per sottolineare e ribadire quanto sia importante considerare tutte le fasi di vita di un materiale e non solo dal momento in cui lo reperiamo in un punto vendita, bensì dalla sua nascita alla sua dismissione, approccio dalla "culla alla tomba". La Fig. 1.11 invece riassume quali sono i principali obiettivi delle costruzioni che si possono definire "sostenibili" in merito all'impatto appena osservato, che anche l'edilizia ha sull'ambiente.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA CAPITOLO 1: LO SVILUPPO SOSTENIBILE

- JEAN-MARC TULLIANI, *Dispense scienze dei materiali,* Lezione 1 Sostenibilità di processi e prodotti nei materiali per l'architettura, a.a 2018/2019
- RACHEL CARSON, *Primavera Silenziosa,* Milano, seconda edizione, Feltrinelli 1973
- DONELLA H. MEADOWS, DENNIS L. MEADOWS, JØRGEN RANDERS, WILLIAM W. BEHRENS III, *I limiti dello sviluppo,* rapporto del System Dynamics Group Massachusetts Institute of Technology per il progetto del Club di Roma sui dilemmi dell'umanità, Milano, seconda edizione, Arnoldo Mondadori editore 1972
- http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/filarete/normativa/internazionali/1972-la-dichiarazione-di-stoccolma/view
- https://it.wikipedia.org/wiki/Programma_delle_Nazioni_Unite_per_l%27ambiente
- https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-sostenibile/cooperazione-internazionale/l_agenda-2030-per-uno-sviluppo-sostenibile/onu-_-le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile/1987--rapporto-brundtland.html
- http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CLT/diversity/pdf/declaration_cultural_diversity_it.pdf
- https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52006DC0508&from=EN
- https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it
- http://datatopics.worldbank.org/sdgatlas/SDG-12-responsible-consumption-andproduction.html
- http://www.isprambiente.gov.it/files2017/pubblicazioni/rapporto/RapportoRifiutiUrbani_Ed.2017_n.272_Vers.Integrale_rev08_02_2018.pdf

2. FANGHI DI SEGAGIONE

La segagione è una tecnica di taglio, la quale permette di ottenere dalla roccia dei blocchi e successivamente delle lastre di pietra accuratamente divise da un'operazione di taglio a lama. Lame di notevole diametro, tendenzialmente circolari e diamantate, sono le componenti essenziali dei macchinari, che nelle ultime tre decadi si sono affinati continuamente. L'utilizzo di una o più lame diamantate, assicura un livello di precisione maggiore. Nel corso del taglio e della levigatura, gli utensili si surriscaldano e la pietra viene cautelativamente bagnata in modo da minimizzare la quantità di pulviscolo presente sul luogo di lavoro e raffreddare gli utensili. Il prodotto di queste azioni, questo mix di acqua e polveri lapidee, ovvero tutti i frammenti derivati dalle varie operazioni di taglio, determinano il materiale denominato "**fango di segagione".** Il fango così ottenuto richiede tempestivamente una disidratazione, in modo tale che lo scarto sia più maneggevole e lavorabile al fine di rendere più facile il suo trasporto e smaltimento. La prima fase per ottenere questo risultato, è quella di addensamento per decantazione, seguita da disidratazione e compattazione. Per ogni tonnellata prodotta si stima l'equivalente di 0,1 m^3, ovvero il 20-30% della massa totale lavorata. Diversi componenti caratterizzano la composizione chimica del fango, la quale rimane in linea con le rocce di provenienza, in particolare l'elemento principale di questi fanghi rimane **la silice**, i cui due elementi principali di cui si compone, ossigeno e silicio, sono i più abbondanti sulla crosta terrestre, pertanto i silicati raffigurano i minerali più diffusi sulla terra. Il luogo in cui si lavora la pietra determina la composizione chimica del materiale finale, se l'approvvigionamento avverrà in cave diverse le caratteristiche dei fanghi diverranno variabili nel tempo. Non solo il luogo influisce sulla caratterizzazione bensì anche il macchinario utilizzato, se non si utilizza la lama diamantata si avranno scarti con una granulometria più grezza, e con una concentrazione di ferro maggiore rispetto un sistema di taglio diamantato. La granulometria propria del pulviscolo ha una dimensione che va da qualche μm a 1-2 mm di diametro, solitamente il 50% dei granuli possiede dimensioni minori allo 0,025 mm. I fanghi si presentano in più sfumature dal grigio chiaro al grigio più scuro, possiedono un valore di umidità compreso tra il 30 e il 40 %, e hanno una massa volumica di 1,5-1,8 t/m^3, considerando l'acqua residua in essi.

2.1 ESTRAZIONE DELLA PIETRA

Nella normativa italiana si distinguono le cave dalle miniere sotterranee, per le prime i materiali espletati nel decreto sono le torbe, i materiali per costruzioni edilizie, stradali e idrauliche, le terre coloranti, il quarzo, le sabbie silicee, mentre per le miniere in profondità si estrae soprattutto materiale pregiato. I materiali tipici delle cave italiane sono:

- Sabbia e ghiaia utilizzati maggiormente nella fabbricazione del calcestruzzo;
- Argilla per mattoni e laterizi in generale;
- Calcare per la fabbricazione del cemento;
- Gesso;
- Pietre da costruzione e rivestimento, marmi, graniti, gneiss, arenarie, travertino, ardesia, ceppo.

Gli step da compiere durante l'estrazione in cava sono principalmente due, in un primo momento si procede al taglio dell'intero blocco dalla parete rocciosa, separandolo dalla cava di appartenenza. Le dimensioni di questo blocco sono variabili in base alla morfologia propria della roccia, al minerale di cui si compone e ai sistemi di discontinuità presenti. Il secondo step comporta la suddivisione in parti minori del blocco per agevolarne il trasporto e la lavorazione nelle fabbriche predisposte per le azioni di finitura. Differenti metodi vengono adoperati per la scissione e tagli del blocco:

- Disgaggio dei blocchi per mezzo di una pressione all'interno dei fori preventivi;
- Scavo con esplosivo;
- Taglio con utilizzo di catene diamantate o motoseghe;
- Taglio con catena.

La tecnica del disgaggio dei blocchi rappresenta un delle più antiche in cui vengono fatti dei fori, la cui distanza varia a seconda del materiale, per mezzo di un trapano; successivamente si inseriscono due elementi rastremati e ripiegati verso l'alto in cui viene interposto un cuneo. Il blocco viene separato agendo con un martello grazie alla forza trasmessa sulla parete dei fori precedentemente preparata. Tecnica di lavorazione con tempistiche maggiori rispetto alle altre, economicamente meno dispendiosa utilizzata anche laddove non sono possibili altri metodi e la roccia presenta piani di debolezza utili alla lavorazione. Un'opzione che si basa sulla stessa metodologia di funzionamento ad eccezione che all'interno dei fori vengono inseriti materiali che da bagnati diventano di tipo espansivo.

La tecnica dell'esplosivo si presenta come più immediata ma risulta essere anche la più impattante a livello ambientale, poiché le polveri prodotte e la quantità di esplosivi utilizzati posso essere molto pericolose se non accuratamente studiate ed eseguite. I blocchi prodotti risultano oltretutto dalla forma molto irregolare; gli esplosivi utilizzati maggiormente nel passato erano la polvere da sparo e la dinamite che oggigiorno sono stati sostituiti da il nitrato di ammonio, la cui esplosione è abbastanza contenuta a livello esotermico, da essere utilizzata all'interno delle miniere. Per rompere e frantumare la parete rocciosa si usano esplosivi ad alta velocità, invece se l'obiettivo è quello di creare pressioni maggiori nelle rocce più morbide, si utilizzano esplosivi con velocità definite minori. Nei casi in cui si verifichi la presenza di gas metano, per cui sarebbe interdetto intervenire con esplosivi, è stato sviluppato un metodo brevettato non esplosivo "Cardox" il quale utilizza anidride carbonica liquefatta.

La tecnica maggiormente utilizzata da almeno due decadi intere è quella attraverso l'uso del filo diamantato, che sfrutta il materiale più duro della scala di Mohs. Dopo aver carotato la roccia con due perforazioni perpendicolari tra loro, si genera il cavo attraverso cui è collocata la catena in acciaio inox diamantata, quest'ultima è chiusa intorno ad una puleggia che imprime contemporaneamente la tensione e la rotazione alla catena stessa. Azionata dalla puleggia, la catena taglia la roccia, e onde evitare l'accumulo di materiale e surriscaldamenti, il taglio viene ripetutamente lubrificato con acqua. In particolare, nei materiali carbonati, privi di quarzo e minerali più duri, questa tecnica fornisce un'eccellente prestazione, in cui la velocità di taglio è all'incirca 10 m^2/h. Tale velocità si riduce del 60% nei materiali più resistenti all'usura, infatti è utilizzata maggiormente per materiali calcarei e cave di marmo, mentre granito, gneiss e altre rocce silicatiche sono solitamente soggette a esplosivo. Il costo dell'estrazione aumenta in modo direttamente proporzionale alla durezza del materiale, calcare e marmi (durezza 3), feldspato (durezza 6) e quarzo (durezza 7).

Infine, l'ultima tecnica la quale produce meno materiale di scarto, tagli più precisi con riduzione dei tempi di finitura successivi è quella che utilizza motoseghe apposite dalla lunghezza variabile tra i 2-6 m. Si adopera per le rocce a bassa tenacità come il travertino e il marmo, l'unica debolezza è relativa all'uso limitato di questi tipi di roccia, alla gestione della macchina e limitata profondità di taglio.

Una volta avvenuto il disgaggio dei blocchi dalla parete rocciosa, occorre procedere alla suddivisione secondaria, la quale permetterà un trasporto e lavorazione più agevolate. Vengono utilizzati dei cunei, la cui azione spingente cerca di separare definitivamente il blocco dal versante della cava, poi si aggiunge l'uso di pistoni pneumatici e si procede con il ribaltamento. I rifiuti di cava vengono ammucchiati, in modo anche da svolgere una funzione armonizzante per il blocco. In alternativa ai cunei si adoperano delle sacche d'aria inserite nelle fessure e poste sottopressione, che gonfiandosi spingono sulle pareti causando la rottura completa del blocco, la procedura viene ultimata con il taglio secondario e trasporto. Il prodotto che si ottiene dai blocchi, ovvero, le lastre accuratamente tagliate, viene realizzato attraverso tre tipi di seghe, multilama, mono-lama e seghe a filo. I materiali utilizzati principalmente per le lame delle seghe sono di due tipi, in acciaio o in acciaio con diamanti incastonati nel bordo, più recenti le lame diamantate.

2.2 IL MERCATO LAPIDEO IN ITALIA E NEL MONDO

Il mercato lapideo negli ultimi vent'anni è cresciuto in modo esponenziale, triplicando il volume di materiale estratto e lavorato da 51 milioni di tonnellate a 153 nel 2018, molte nazioni hanno contribuito in questo

risultato, fra le quali come possiamo vedere in figura 2.1 le più impegnate sono state la Cina, l'Italia e l'India. L'industria della pietra e del marmo rimane una delle poche ad essere soggetta a uno sviluppo costante, l'Italia in particolare, rimane il primo produttore a livello Europeo il quale soddisfa molte commesse anche di macchinari e materiali utili alla lavorazione della pietra stessa. L'interscambio che vi è oggi con le altre nazioni è fondamentale per la nostra economia, nel 2018 sono stati venduti 56,4 milioni di tonnellate di materiale, di cui 30,2 sono stati scambiati direttamente allo stato grezzo mentre la restante parte di 26,2 è stata venduta come prodotto finito. Dal report annuale "Stone Sector 2018 - Trade and Innovation" elaborato dallo studio e ricerche IMM, risulta che vi è stato un forte aumento della quantità di pietra naturale venduta, in contrapposizione alla diminuzione del valore attribuito a ogni tonnellata esportata, che oggigiorno è pari a 267 €/t. Per quanto concerne la Cina, la quale ricopre il primo posto, si può riscontrare un calo sull'export cinese di pietra naturale, sostituito e rafforzato da un aumento della produzione e vendita della pietra artificiale. I mercati di sblocco per quest' ultima sono gli Stati Uniti, Canada, Regno Unito e Brasile. La promozione e la conoscenza, le skills possedute dal settore italiano sono da questi gruppi come la IMM difesi e diffusi, in modo che il mercato non venga un domani sostituito completamente da questi prodotti artificiali. L'alta crescita di domanda è evidenziata dallo Stone Sector 2018 per Paesi Bassi, Filippine, Slovenia e Nuova Zelanda. Il mercato di crescita italiano prevede una vendita di prodotti tendenzialmente allo stato grezzo sul mercato cinese e algerino, mentre sul mercato dei prodotti finiti rivela un calo dovuto principalmente alla contrazione della domanda USA.

2.3 PRODUZIONE E COMPOSIZIONE DEI FANGHI DI SEGAGIONE

L'estrazione in cava e le numerose azioni di taglio producono i rifiuti, per cui bisogna stoccarli o reimpiegarli. L'acqua, come già precedentemente accennato, non ha solamente lo scopo di raffreddare gli utensili adoperati o di agevolare il taglio, bensì anche contenere il pulviscolo che si diffonde nell'area di lavoro, con conseguenze gravi sia per l'ambiente che per l'uomo. Lo scarto generato dal taglio, miscelato all'acqua, crea il così detto "fango di segagione" il quale diverrà in questa tesi di studio il protagonista indiscusso generatore del prodotto edilizio finale che si andrà a creare. In questa fase della lavorazione la percentuale ricoperta della concentrazione di solido in massa si aggira al 40%, valori per cui sono necessarie le operazioni di disidratazione e separazione tra fase liquida e solida (marmettola), rendendoli più maneggevoli con una riduzione dell'umidità al 25%. Di prioritaria importanza è l'identificazione e classificazione di questa marmettola come rifiuto o come sottoprodotto, in quanto riutilizzabile in altri cicli di lavorazione. Ciò può essere considerato possibile se e solo sé, quest'ultima è in grado di soddisfare tutti i requisiti di cui nel D.P.R 13 giugno 2017, n. 120, si può osservare ai fini del comma 1 e ai sensi dell'art. 183, comma 1, del decreto legislativo del 3 aprile 2006, n.152:

- I fanghi sono generati nel mentre di una realizzazione di un'opera di cui costituiscono parte integrante, e il cui obiettivo principale non è la produzione di suddetto materiale;
- Se si genera, per la realizzazione di reinterri, riempimenti, rimodellazioni, recuperi ambientali o altre forme di ripristini e miglioramenti ambientali;
- In processi produttivi, in quanto sostituzione dei materiali da cava;
- Sono idonei a essere utilizzati senza trattamenti, differente dalla normale pratica industriale;
- Soddisfano i requisiti previsti.

Qualora anche solo un requisito non sia totalmente soddisfatto, il fango di segagione diverrà automaticamente catalogato come un rifiuto speciale non pericoloso. I fanghi sono considerati rifiuti inerti, purché le componenti nocive siano inferiori a valori di sicurezza. L'attenzione maggiore va messa nello smaltimento e stoccaggio, se i fanghi dovessero essere conservati in posti e modi sbagliati, potrebbero disperdersi nell'ambiente, essendo potenzialmente dannosi proprio grazie alle loro dimensioni, causerebbero problemi respiratori e di visibilità nell'intero circondario. Se una cattiva manutenzione avvenisse nelle acque di scarico, in seguito alle lavorazioni fatte, potrebbero riscontrarsi modifiche nei parametri fisici, chimici e biologici di corpi d'acqua superficiali, con conseguente ripercussione sulla flora e fauna, inefficienza del funzionamento del sistema depurativo fognario,

e alterazione della composizione mineralogica del suolo e sottosuolo. In altri tempi, o in condizioni definite illegali rispetto alla normativa, i fanghi venivano rilasciati direttamente nei corsi d'acqua, senza alcun trattamento preventivo, provocando scompensi nella catena alimentare ittica, poiché veniva ostacolata la fotosintesi delle alghe. Oggigiorno sono effettuati attenti trattamenti di depurazione, prima del passaggio all'interno dei sistemi fognari. Il fango potrebbe subire contaminazioni da sostanze nocive, la cui presenza è dovuta dal diretto contatto con i macchinari di taglio. Metalli classificati come pesanti, Nichel (Ni), Cromo (Cr), Manganese (Mn), se il taglio è avvenuto con un sistema in Rame (Cu) o Cobalto (Co), nel caso di utensili diamantati, la loro inalazione può determinare problematiche gravi al sistema respiratorio. La contaminazione può riguardare anche gli idrocarburi pesanti (Hc) presenti nei lubrificanti usati per i macchinari di taglio, se sono impianti più arcaici e superati, sprovvisti di dispositivi di recupero degli oli lubrificanti. Se la percentuale di idrocarburi pesanti supera i 500 ppm, occorre smaltire il materiale in apposite discariche progettate per i rifiuti speciali. Lo smaltimento degli scarti ha un costo, stimato dai 2 a 5 centesimi di euro per ogni kg di fango trattato, a cui si devono sommare i costi dovuti allo spostamento e confinamento. Questi prezzi subiscono variazioni in base al volume di limo generato, quindi a seconda che sia un'azienda più grande o più piccola c'è un cambiamento di prezzi, con volumi maggiori i costi si abbassano. Per la depurazione dell'acqua dai fanghi di segagione, si è recentemente passati alle nuove tecniche di disidratazione tramite filtropressa, prima una raccolta e decantazione del fango con il rinserimento nel ciclo di produzione delle acque chiare, e successivamente disidratazione e compattazione dei fanghi rimanenti. Se l'obiettivo è quello di riciclare il fango prodotto bisogna attenersi all'art. 31/33 del D. Lgs. Del 5 febbraio 1997, n. 22 la quale etichetta i rifiuti prodotti dal taglio e dalla segagione della pietra, come CER 010413. Dato l'impatto che anche questa tipologia di rifiuti ha a livello economico e ambientale, l'industria lapidea deve anch'essa soddisfare i requisiti di sostenibilità già citati. Per rendere questo possibile bisognerebbe attuare una prima separazione dei metalli pesanti presenti nel sottoprodotto finale, ottenendo da un lato un composto più fine e puro e dall'altro la graniglia esausta potrebbe essere rilanciata nel ciclo produttivo. La separazione magnetica è la soluzione ipotetica più semplice e diretta da applicare, in base alla quantità di limo generato, c'è una prima procedura la quale prevede la separazione direttamente in situ. Con l'installazione di apparecchiature progettate per l'allontanamento della graniglia dal sottoprodotto, risultando una tecnica più consona alle aziende di grande produzione. Per ottimizzare il dispendio economico, qualora il fango prodotto abbia dimensioni volumetriche decisamente ridotte, la separazione più consona è quella di creare un impianto centralizzato in cui sono raccolti e trattati i fanghi di più operatori. In questa seconda tecnica i fini lapidei generati si presentano più eterogenei, dato che la miscela di fanghi di diversa provenienza, elimina i caratteri mineralogici e chimici legati al sito.

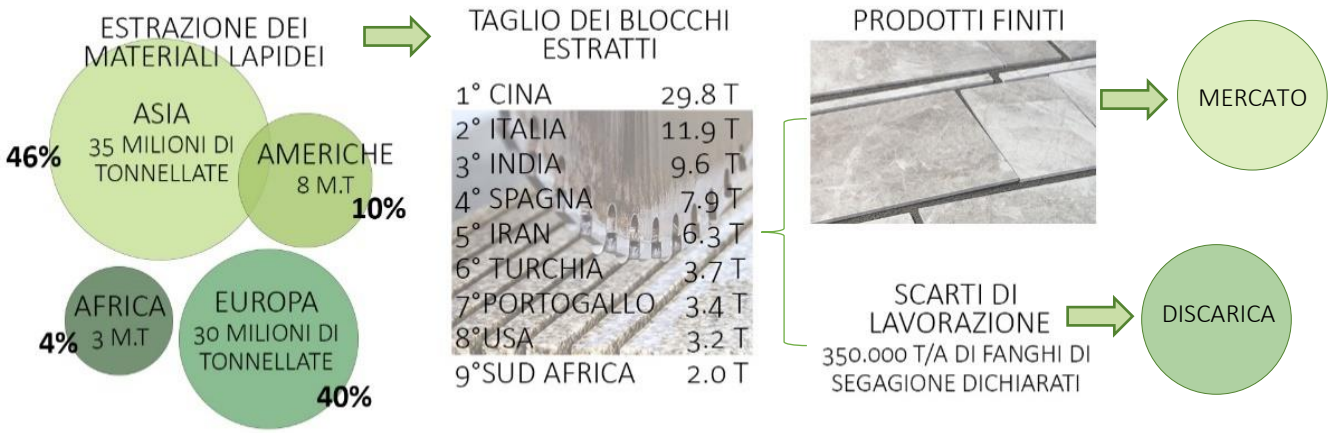


Figura 2.1, Lo smaltimento dei fanghi derivati dal taglio della pietra, immagine autoprodotta.

Per smaltire i fanghi di segagione in Europa si spendono circa 30.000.000 €/a, attualmente non esistono alternative attuate e prese in considerazione.

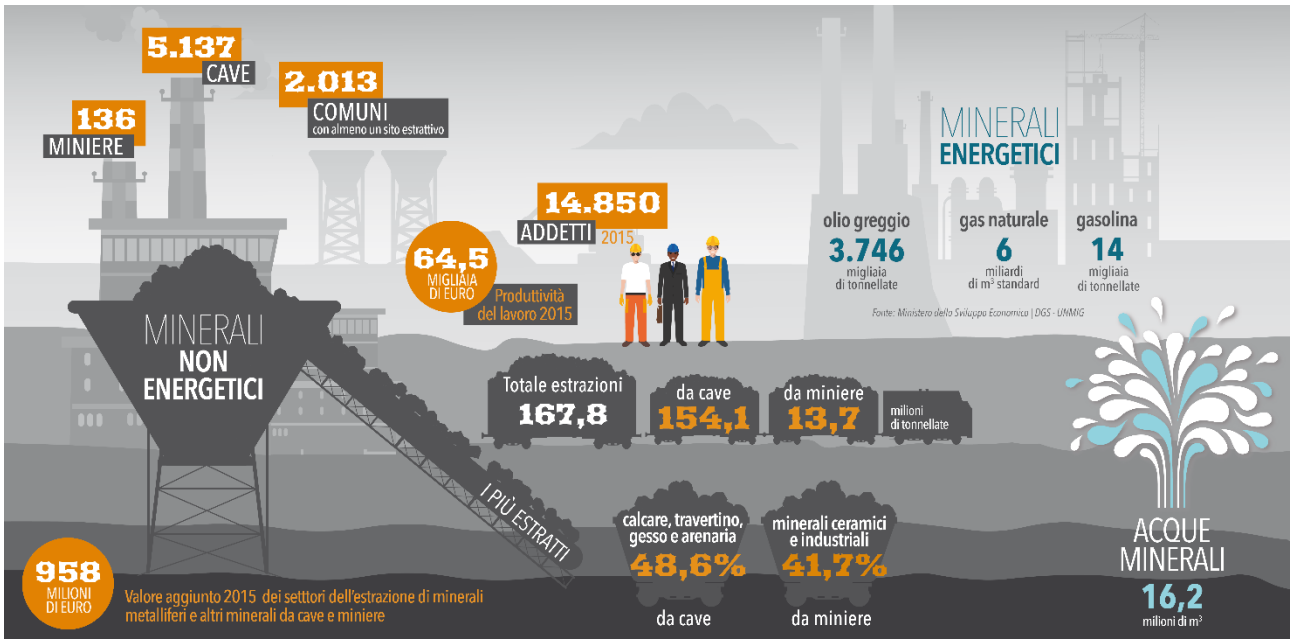


Figura 2.2, Attività estrattive da cava e miniere in Italia, anno 2016, fonte ISTAT.

2.4 ATTUALE REIMPIEGO DEI FANGHI DI SEGAGIONE

L'ultimo periodo è stato contraddistinto dallo studio nazionale e locale, del riuso di questo sottoprodotto dell'industria lapidea, analizzando le rispettive problematiche dei settori civile e edile, in particolar modo facendo riferimento a due studi editi nel territorio piemontese nel bacino Ossolano e in quello di Luserna. Una delle azioni più facili e veloci da intraprendere è quella di riutilizzare tale materiale in campo architettonico civile-edile, come materiale di riempimento utilizzato nei sottofondi stradali, murature di contenimento. Una volta filtropressato il fango subisce le azioni di essiccatura, disgregazione e miscelazione insieme ad altri composti per poi essere adoperato per la produzione di uno stabilizzato adatto ad opere stradali. Tra gli usi più interessanti troviamo:

- **Filler per conglomerati bituminosi,** nella realizzazione del manto stradale il conglomerato bituminoso costituisce quello più comunemente denominato come asfalto, le cui componenti sono riassunte nella tabella 3 sottostante.
- **Smagrante di impasti per manufatti in laterizio,** la natura silicatica dei fanghi fa sì che questi ultimi siano adatti ad essere utilizzati come additivi smagranti onde evitare il ritiro per essiccamento nella cottura di prodotti edilizi, mattoni, laterizi e cementi (Tab. 4-5). Con la loro aggiunta, si ha una maggiore porosità, limitazione di ritiro e fessurazione del manufatto. La percentuale di fango impiegata è variabile tra il 15 e 40% sul totale del composto, in particolare come si potrà vedere nel capitolo riguardante l'attività di laboratorio, la sottoscritta tesi di studio, propone un suo utilizzo iniziale al 65% che in definitiva sarà intorno al 49% della miscela finale.

COMPONENTI DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO	FUSO GRANULOMETRICO RICHIESTO	PERCENTUALE RICHIESTA
Pietrischetto	10-25 mm	Circa 18% in massa
Graniglia	2-20 mm	Circa 35% in massa
Sabbia	0,075-2 mm	Circa 38% in massa
Bitume		Circa 4% in massa
Filler	<0,18 mm con l'85% in massa <0,75 mm e 50%<0,05 mm	Circa 5% in massa Nello stato superficiale anche 7%in massa

Tabella 3, composizione generale di un conglomerato bituminoso.

COMPOSIZIONE MINERALOGICA	%
Minerali argillosi	15-50
Sabbia quarzosa	14-40
Calcare e dolomia	3-30
Ossidi di ferro	4-7
Ossidi alcalini	2-5
Sostanze organiche	1-3

Tabella 4, composizione mineralogica di laterizi, fonte Testori 2000

	PIU' FREQUENTE %	MENO FREQUENTE %
p.c.	12-15	5-20
SiO_2	44-54	40-59
Al_3O_2+TiO_3	10-16	8-18
Fe_3O_2	4-7	4-10
CaO	10-15	5-21
MgO	1.5-3.5	1-8
K_2O	1.5-3	-
Na_2O	0.5-1.5	-

Tabella 5, composizione chimica di laterizi, fonte Testori 2000

Tali fanghi devono soddisfare determinati requisiti, a livello di lavorabilità devo possedere l'esatta palpabilità, possibilità di stoccaggio su piazzali, valori di umidità tra 20-40% atti a favorire la miscelazione a umido, inoltre si devono considerare i costi del trasporto dei materiali, i fenomeni che si verificano dopo cottura, le variazioni cromatiche che può assumere il manufatto e il ritiro in acqua.

- **Materiale di base per la produzione di pietre agglomerate,** le industrie produttrici di pavimentazioni spesso adoperano agglomerati quali, cemento, materiale di ricarica e graniglia; i fanghi di segagione sono un esempio già adoperato in questo modo a Carrara. L'accademia ha invece adottato l'utilizzo di fanghi derivati dalla pietra di Luserna, dove i fanghi sono stati utilizzati come filler per la creazione di pietre agglomerate.
- **Materiale di base per la produzione di manufatti decorativi e di arredo,** l'impiego di questi fanghi al posto di molti materiali utilizzati per produrre oggetti d'arredo o decorativi, comporterebbe sicuramente un abbassamento dei costi e un recupero del materiale evitando il suo smaltimento in discarica. Dall' urban design all' arredo da bagno, rubinetteria, oggettistica varia…
- **Fondente in impasti per grès colorato,** sperimentazione eseguita (da SASSONE & DANASINO, 1995), i fanghi della pietra di Luserna mostrano però un comportamento troppo energivoro dato il tipo di trattamento; prove di greificazione a 1180°C, per la durata di 70 ore con cicli di riscaldamento e raffreddamento. Dato l'aspetto finale e la colorazione rappresentano un'opzione per l'impasto del grès colorato, ma il trasposto e l'energia consumata per la produzione non lo rendono ancora favorevole e adatto al commercio in quanto sostituto.
- **Impermeabilizzante e coibentante in discariche,** un materiale che trattiene e non lascia filtrare l'acqua si presta bene all' impermeabilità dei terreni selezionati come siti di discariche, salvaguardando il suolo e le falde acquifere dalle contaminazioni possibili. Fanghi sottoposti a verifiche di conducibilità idraulica molto severe e restrittive, che miscelati con altri componenti possono ottenere i giusti parametri.
- **Agricoltura,** un'ultima possibilità di utilizzo di questi fanghi è in forma di fertilizzante nei terreni a scopo agro-pastorale. Ho già sottolineato l'impermeabilità di tale materiale per cui diverrebbe difficile se utilizzato senza accorgimenti permettere il passaggio della vegetazione, è stato in ogni modo dimostrato come specifici trattamenti e corrette miscele con prodotti sabbiosi possano rendere il materiale utile alla creazione di un compost fertile.

Tali opzioni, necessitano per la loro applicazione, di alcune caratteristiche quali, una distribuzione granulometrica del materiale costante, gli aggregati non devono presentare dissonanze a livello dimensionale e di forma così diverse fra loro, così come nella composizione e qualità. L'umidità misurata nel materiale non

deve essere superiore al 2-3% e vi deve essere l'assenza di elementi ferrosi. Nelle aree in cui è previsto l'inserimento di impianti di trattamento dei fanghi, sì può pensare di minimizzare i costi utilizzando combustibili a basso costo (RDF)[12] e recuperando il calore prodotto dagli impianti esistenti.

[12] RDF, Refuse Derived Fuel, rifiuti i quali subiscono determinati trattamenti da incrementare il proprio potere calorifero. Prima pellettizzati e successivamente utilizzati come combustibile aggiunti per gli inceneritori, favorendo processi di combustione all'interno del bruciatore.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA CAPITOLO 2: I FANGHI DI SEGAGIONE

- STEFANO GHIOTTI, *Tesi di Laurea Magistrale: Scarti di lavorazione della pietra ornamentale, analisi di reimpiego in formulazioni geopolimeriche contenenti loppa d'altoforno,* Politecnico di Torino 2017
- SALOMONE LORENZO, *Tesi di Laurea Magistrale: Ottimizzazione dello scambio termico di conci energetici per le gallerie,* Politecnico di Torino a.a 2017/2018, pp. 120-129
- http://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/sistemi-produttivi/attivita-estrattiva/impatto-ambientale-la-marmettola
- https://www.istat.it/it/archivio/226030
- http://www.marmonews.it/it/category/statistiche/
- http://carraramarmotec.com/language/it/highlights-2019/
- http://www.naturalstoneinfo.com/download/interregIII.03.pdf

3. I GEOPOLIMERI

Classificabili in quanto polveri tendenzialmente allumino-silicatiche, fosfatiche, e boriche si definiscono i leganti idraulici, i quali fanno presa e induriscono in acqua, disciolti in ambienti fortemente basici. Altri studiosi definiscono i geopolimeri in quanto ceramiche "consolidate" attraverso reazione alcalina "alkali bonded ceramics", ovvero ceramiche prodotte utilizzando solamente reazioni chimiche evitando processi di sinterizzazione termica e l'uso conseguente di alte temperature connesso a tale processo, dando luogo così, ad un materiale avente le medesime proprietà di uno ceramico. Sono definiti in quanto materiali attivati tramite alcali, questi ultimi rappresentano tutti quei composti che disciolti in acqua danno luogo alla reazione delle basi, per l'appunto reazione alcalina, vi rientrano non solo le basi bensì anche i sali. Questi materiali sono componenti di una famiglia più ampia di leganti inorganici[13], derivati dalla reazione con un sale di metallo alcalino e una polvere di silicati, di cui fanno parte i classici clinker. In Fig. 3.1 possiamo prendere visione del posizionamento di questa grande famiglia di leganti inorganici, in cui sull'ascissa troviamo il contenuto di alluminio e sull'ordinata il contenuto di calcio. I geopolimeri e i polimeri inorganici sono collocati in modo tale da mostrare un più alto contenuto di allumina e minor contenuto di calcio, a differenza dei classici cementi come il Portland o anche quelli a base di zolfo e allumina.

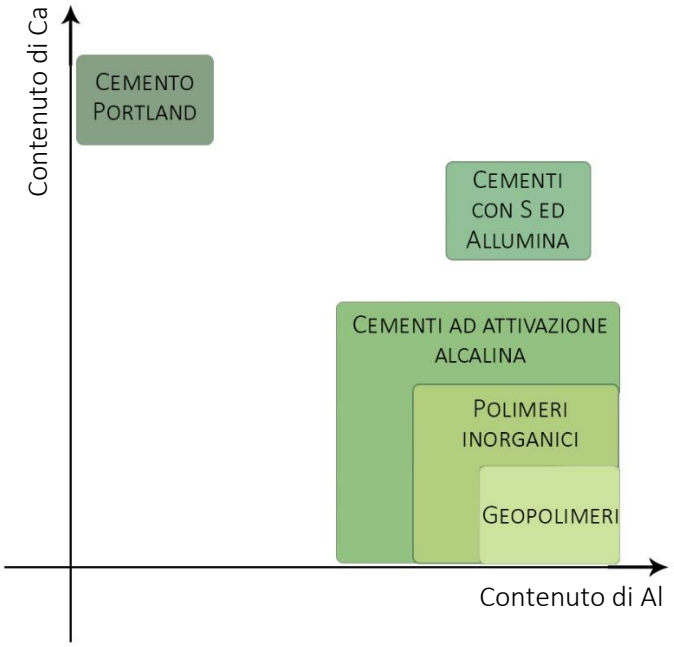


Figura 3.1 Proposta di classificazione di "materiali attivati con alcali" secondo J.S.J. van Deventer e J.L. Provis. Sono riportati per confronto i cementi Portland e solfo alluminatici. Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati, figura rielaborata.

Negli ultimi anni l'utilizzo di tali materiali ha avuto una notevole diffusione in campo industriale come materiali compositi, in particolar modo nei paesi meno provvisti di cemento Portland come l'Australia, in cui l'uso di geopolimeri derivati da ceneri leggere utilizzate nelle centrali elettriche a carbone, viene riutilizzato per la produzione di pavimentazioni stradali. Le ceneri leggere sono prevalentemente costituite da alluminosilicati, per lo più amorfi, date le alte temperature presenti nel bruciatore, gli atomi di cui si compone il solido non presentano un ordine a lungo raggio nella loro composizione, risultando instabili chimicamente e di conseguenza solubili in ambiente basico. Nella Tab. 6, possiamo vedere che oltre le ceneri, scarti e altri rifiuti prodotti da lavorazioni ad alte temperature possono divenire componenti utili alla realizzazione di un

[13] leganti inorganici, rappresentano un materiale di tipo inorganico che ha il ruolo di unire due componenti dalla fase di presa a quella dell'indurimento, impastato con acqua si crea una massa plastica che miscelata agli altri composti forma un insieme con capacità di resistenza meccanica.

geopolimero.

Materia prima	Componenti chimici (peso %)
Caolini ed altre argille	SiO_2 55-60; Al_2O_3 37-42; Fe_2O_3 0.1–1.5; TiO_2 0.1–1.5
Ceneri volanti da centrali a carbone [5]	SiO_2 16–21; Al_2O_3 15–19; Fe_2O_3 1.5–3.8; CaO 1.1–6.5; MgO 0.3–1.1; carbonio 5-8
Ceneri pesanti	SiO_2 49–62; Al_2O_3 6–10; Fe_2O_3 4–14; CaO 11.5–19; MgO 1.8–2.9; Na_2O 1.5– 2.5
Scorie d'altoforno macinate, granulate [6]	SiO_2 33–38; Al_2O_3 9–13; Fe_2O_3 41; TiO_2 0.3–0.9; CaO 38–43; MgO 7–12; K_2O 0–0.8; MnO 0–2; S 0–2.5; H_2O <20
Residui del processo della bauxite [7]	SiO_2 10; Al_2O_3 17; Fe_2O_3 0.1–15; TiO_2 9; CaO 9; Na_2O 5; perdita fuoco <10
Pozzolana	SiO_2 21–31; Al_2O_3 8–16; Fe_2O_3 3–8; CaO 2–3; MgO 0.5–1; K_2O 1–7; Na_2O 0.6-3.2
Laterite	SiO_2 51-57; Al_2O_3 15–19; Fe_2O_3 8–10; CaO 2–4; MgO 1.5–2; K_2O 4–5; Na_2O 2-4
Fanghi lavoraz. Al	SiO_2 7-8; Al_2O_3 14–15; Fe_2O_3 43; CaO 12; TiO_2 6; Na_2O 2; ZnO 1; V e Cr < 0,3
Ceneri vulcaniche [8]	SiO_2 44.3–49; Al_2O_3 14–16.4; Fe_2O_3 9.9–148; CaO 4–9.8; MgO 3.4–7; Na_2O 3.2– 5.2; TiO_2 2.1–4.2; K_2O 1.1–3.1
Fosfati [9]	P 8.62% totale, di cui 0.002% solub in acqua, 1.26% solub. in ac. citrico; K 0.19%; 6.4% Ca; Mg 5.64%; Fe 6850ppm; Mn 2764ppm; Zn 261ppm; Cu 70 ppm

Tabella 6 Materie prime impiegate per la preparazione di geopolimeri con intervalli caratteristici di composizione, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati.

Altri rifiuti industriali, soggetti a processi svolti ad alte temperature, potrebbero essere utilizzati come MPS (materia prima secondaria) nei geopolimeri, solamente che alcuni studiosi ritengono che le scorie di altoforno macinate e granulate dovrebbero rientrare nella classificazione propria al cemento Portland. All'interno dei geopolimeri il calcio è molto più inferiore che nei cementi comuni, e la presenza di alluminosilicati li rende chimicamente e strutturalmente paragonabili alle rocce naturali anche per caratteristiche quali la durezza, la stabilità chimica e una longevità uguale a quella geologica.

3.1 CENNI STORICI

Uno scienziato di origine ucraina, V.D Glukhovsky, ricercò negli anni 50' le principali differenze tra i cementi più antichi rispetto ai calcestruzzi moderni. Sintetizzò dei leganti alluminosilicati derivati da argille, feldspati, ceneri vulcaniche e vari tipi di scorie, mostrando un comportamento superiore a quello dei materiali frequentemente utilizzati. Negli anni 70' si passa dai "soil cements" di Glukhovsky ai "géopolymères" di J. Davidovits, essenzialmente compositi di metacaolini. Il fine ultimo di questi importanti studi era quello di scoprire un materiale di rimpiazzo alle sorgenti organiche per i composti resistenti al calore e agli attacchi da acidi e solventi organici. I primi risultati prodotti sono stati nei rivestimenti antifiamma delle navi da crociera, utilizzati come materia prima per compositi in fibre di carbonio, come protezioni termiche nelle strutture in legno, adesivi per alte temperature, e altre applicazioni più specifiche. Anche nell'ingegneria civile si è diffuso l'interesse nell'uso dei geopolimeri in ambito strutturale, agli inizi degli anni 90' del secolo scorso, J. Wasties elaborò prodotti ad alte prestazioni partendo dall'attivazione di ceneri di centrali a carbone. J. L. Provis e J.S.J. van Deventer elaborano nel 2009 un riassunto dello stato dell'arte, spiegando il processo da polvere naturale/sintetica di alluminosilicati a geopolimeri come il passaggio chimico da silicati ad alluminosilicati in soluzione a formare monomeri, i quali polimerizzano successivamente reticolando in catene, anelli e strutture tridimensionali prima di essiccarsi completamente.

3.2 PREPARAZIONE

All'interno di una soluzione basica vengono disciolti polveri amorfe di alluminosilicati, che conseguentemente a una giusta miscelazione si indurisce e acquista proprietà meccaniche. Prima si miscela, poi si cola in un

apposito stampo e successivamente si lascia essiccare, questi processi avvengono nella prima e seconda fase a temperatura ambiente mentre per l'essicamento, sempre parlando in modo generico e non per il singolo materiale trattato, che a seconda delle caratteristiche può indurire acquisendo proprietà meccaniche senza l'utilizzo di stufe ad alte temperature; tendenzialmente le temperature di stagionatura se utilizzata la stufa sono dai 40°C ai 200°C. Se le applicazioni ultime in cui il manufatto prodotto viene adoperato sono di tipo strutturale, oppure sono state generate partendo da una miscelazione con composti poco reattivi, la loro ultimazione e ottimizzazione delle capacità termiche andrebbe supportata dall'utilizzo di alte temperature in stufa, magari ripetute ciclicamente e questo diverrebbe un processo energivoro e dispendioso due aggettivi incongruenti ai punti di forza dei geopolimeri descritti sino a questo momento.

3.3 LE PROPRIETA' DEI GEOPLOIMERI

Oltre che dal materiale utilizzato le proprietà dei geopolimeri dipendono anche dalla chimica del processo, varie formulazioni sono state testate in laboratorio e sono oggigiorno presenti in produzioni industriali con le seguenti caratteristiche:

- Elevata resistenza a compressione, caratteristica tipica del calcestruzzo, e tempi veloci di formatura, presa e maturazione;
- Buona resistenza all'abrasione, in particolar modo data l'aggiunta di fibre in PTFE[14];.ù
- Resistenza al fuoco sino a 1000°C, priva emissione di gas nocivi sebbene possano essere stati rinforzati con fibre di carbonio;
- Eccellente resistenza agli agenti chimici;
- Assenza di reazioni sgradite tra matrice e aggregati;
- Basso ritiro e ottima resa finale estetica nel replicare strutture a rilievo in stampi;
- Bassa conducibilità termica, adatto ad essere un materiale di tipo isolante;
- Buona adesione ad altri materiali quali, cls fresco e vecchio, acciaio, vetro e ceramica;
- Protezione di rinforzi in acciaio grazie a pH residuale alto e bassa velocità di diffusione dei cloruri;
- Ottimizzazione dei costi con riduzione del 10/30% rispetto al cemento Portland, qualora la matrice sia costituita da rifiuti e provenienti da scarti di produzione.

Tutte le caratteristiche sopracitate non sono sempre proprie di ogni geopolimero derivato da ogni tipo di materiale, è necessario studiare una composizione ideale a seconda di ogni utilizzo finale, ad esempio alcuni studiosi hanno indicato una resistenza a compressione compresa tra i 28 e 128 MPa, dopo 28 giorni di stagionatura, di geopolimeri con densità 2,00-2,40 g/cm^3, ottenuti dagli scarti prodotti come ceneri dalle centrali a carbone. Quelli meno densi hanno dei valori tra i 0,99-1,29 g/cm^3, la cui resistenza a flessione varia invece tra i 5 e 14,2 Mpa. Gli studi che riportano i dati del modulo elastico E, illustrano dei valori compresi tra i 17/18 GPa.

Densità reale (g/cm3)	Resistenza a flessione (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)	Conducibilità termica (W/(m • K))
1.43 ± 0.03	8.7 ± 0.6	73 ± 1.5	0.23 ± 0.02
2.29 ± 0.02	32.1 ± 1.2	111 ± 2.4	1.10 ± 0.02

Tabella 7, Proprietà meccaniche e termiche di geopolimeri a base di metacaolino in funzione della densità, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati.

La durabilità dei geopolimeri, le proprietà che acquisiscono una volta stagionati e inseriti nel loro campo di applicazione, sono varie e la letteratura che è stata sviluppata sino ad oggi mostra ancora pochi esempi. Nei diagrammi raffigurati di seguito in Fig. 3.2 e Fig. 3.3 è importante sottolineare l'aspetto saliente ovvero la miglior prestazione in termini di resistenza a compressione è raggiunta in modo proporzionale al tempo trascorso. In Fig. 3.2 viene descritto un comportamento differente in cui il geopolimero assume dei risultati di durabilità maggiore. L'ambiente considerato è fortemente aggressivo, come atmosfere marine o acide o

[14] PTFE, politetrafluoroetilene è un polimero normalmente conosciuto con il nome commerciale di Teflon, resiste bene alle alte temperature è ricopre il primato nei materiali per il coefficiente di attrito più basso.

contenenti solfati. I geopolimeri mostrano in questo studio condotto una migliore resistenza chimica a lungo termine nei confronti dell'acido cloridrico. Mentre in Fig. 3.3 possiamo vedere come il luogo del consolidamento influisca sulla resa finale. In questo caso le malte lasciate a stagionare all' aria presentano delle prestazioni in termini di resistenza a compressione maggiori.

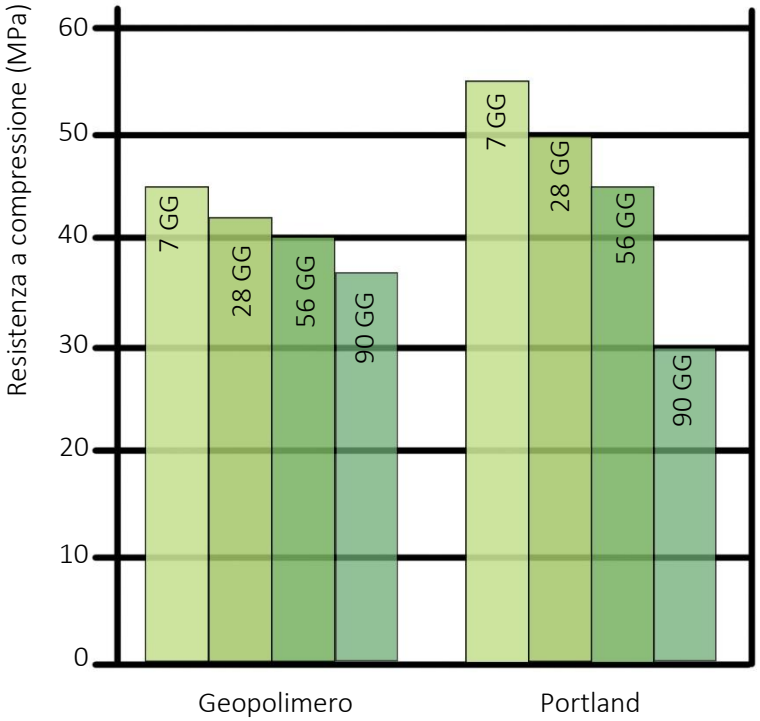


Figura 3.2 Resistenza a compressione di malte, preparate a partire da geopolimeri ottenuti da attivazione basica di ceneri volanti e da comune cemento lasciate in soluzione di HCl, 0,1 N (acido cloridrico). Portland, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati, immagine rielaborata.

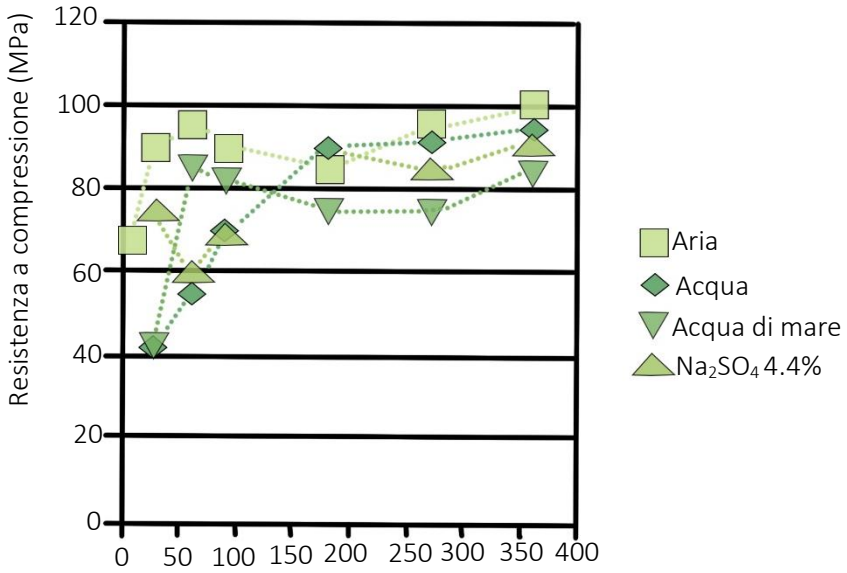


Figura 3.3 Resistenza a compressione di malte, preparate a partire da geopolimeri ottenuti da attivazione basica con ceneri volanti con NaOH e silicato di sodio, lasciate a consolidare in aria, acqua, acqua di mare e in soluzione di Na_2SO_4, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati, immagine rielaborata.

3.4 LE APPLICAZIONI

Così come le proprietà di questi materiali sono tante, lo sono anche le possibili applicazioni nei vari settori:

- Materiali antifiamma e rivestimenti refrattari in genere;
- Adesivi;
- Matrici per composti;
- Rocce artificiali per decoro e restauro di beni culturali;
- Stampi per fonderia e mattoni refrattari;
- Riparazioni per strutture in cemento;
- Materiali e malte da costruzione a basso costo;
- Inglobamento di sostanze inquinanti, rifiuti e ceneri in una matrice inerte quale il geopolimero.

Nel campo dell'edilizia e delle costruzioni, questi materiali vanno a sostituire in modo efficiente tantissimi materiali attualmente in uso, quali cemento Portland, PVC, resine epossidiche, poliesteri e poliuretani. Ad oggi si stanno studiando applicazioni atte al raffreddamento degli edifici, per evitare di installare impianti che contribuiscono solamente al consumo di energia e produzione di CO_2, possiamo elencare qua di seguito i diversi ambiti in cui si è già applicato l'uso di questi materiali:

- Tubi per fognature, in presenza di acido solfidrico hanno dimostrato maggior stabilità, rispetto ai comuni cementi e pvc;
- Scarichi fognari, non reagiscono alle acque contaminate, evitando possibili attacchi chimici, in confronto al Portland;
- Prefabbricati per facciate, i cui costi e densità del materiale, connessa all'aspetto isolante assunto dal tamponamento verticale, si mostrano superiori rispetto numerosi materiali;
- Elementi strutturali quali travi e colonne prefabbricate, la cui resistenza a compressione più rapida a livello di tempistiche permette installazioni più immediate;
- Pilastri utilizzati nei terreni particolarmente ricchi di solfati, molto più resistenti del cemento Portland il quale sarebbe soggetto agli attacchi chimici e al successivo degrado, rendendo la sua funzione non correttamente svolta e pericolosa per tutto il sistema costruttivo.

Figura 3.4 Geopolimeri e materiali da costruzione a confronto, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati.

Per capire meglio come sfruttare i punti di forza di questi materiali a seconda della destinazione d'uso ci si può riferire ai seguenti diagrammi di Ashby in cui vediamo caratteristiche indispensabili ad esempio in campo edile. La resistenza a compressione atta a capire la duttilità o fragilità di un materiale a seconda delle sollecitazioni a cui viene sottoposto, viene commisurata alla densità del materiale in Fig. 3.5. In questo caso si può osservare come un'alta Rc (Pa) sia direttamente proporzionale a un altrettanto alto valore di densità (kg/m^3), le schiume si classificano come i materiali aventi meno capacità di resistenza a compressione mentre le ceramiche industriali/tecniche ricoprono i valori più alti. I geopolimeri assumono una posizione di mezzo fra i cementi, i ceramici non tecnici e i compositi a base polimerica. Tra le pietre, mattoni, cementi e geopolimeri vi sono differenti valori di densità ma simili dati rispetto al rapporto tra la tensione e la deformazione del materiale.

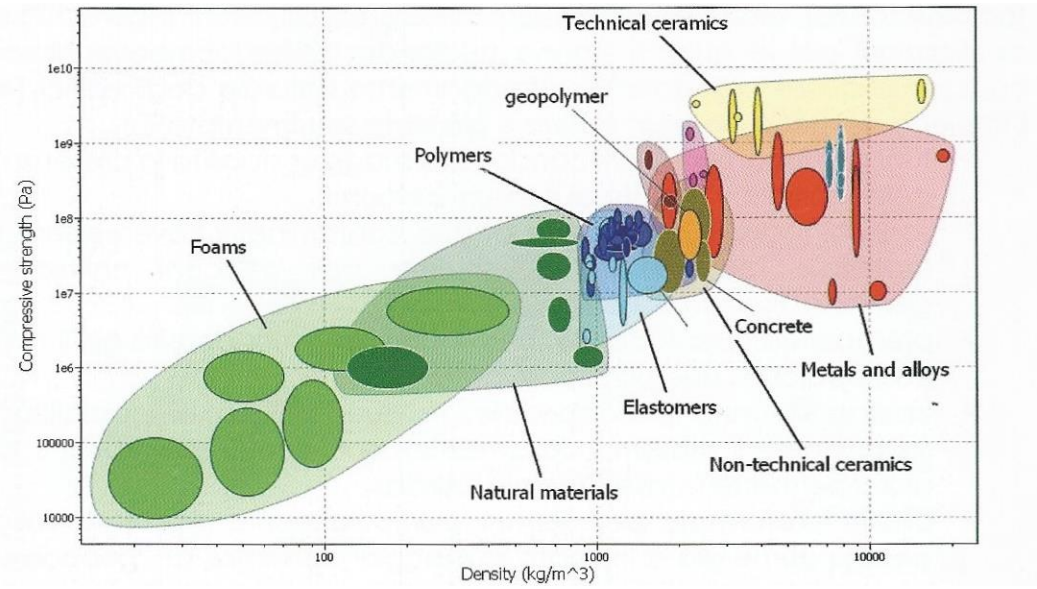


Figura 3.5 Diagrammi di Ashby rappresentanti le diverse classi di materiali in funzione della Rc (Pa) e ρ (kg/m^3).

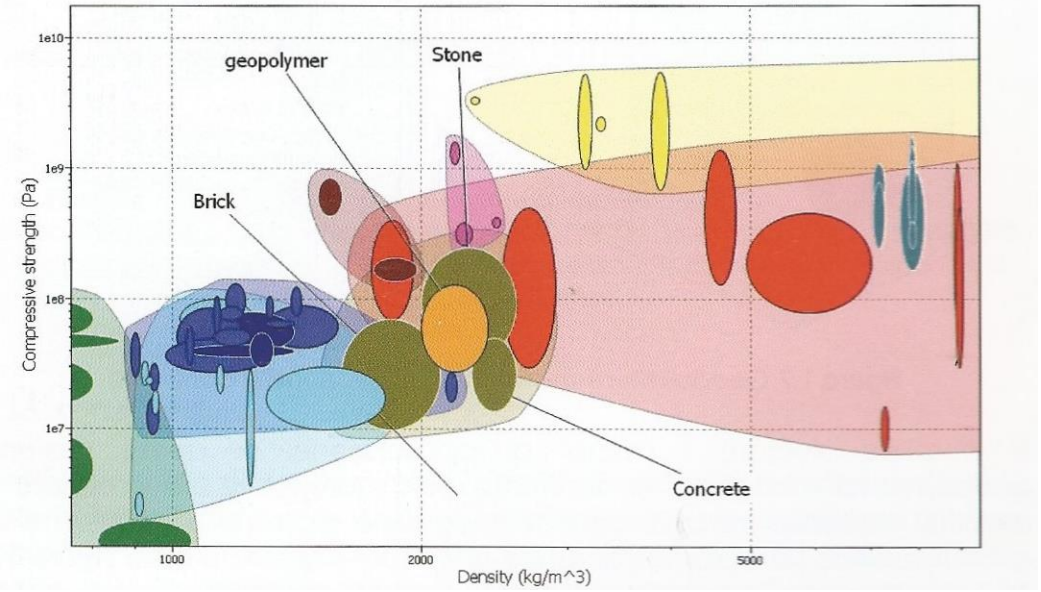


Figura 3.6 Zoom della figura 3.5.

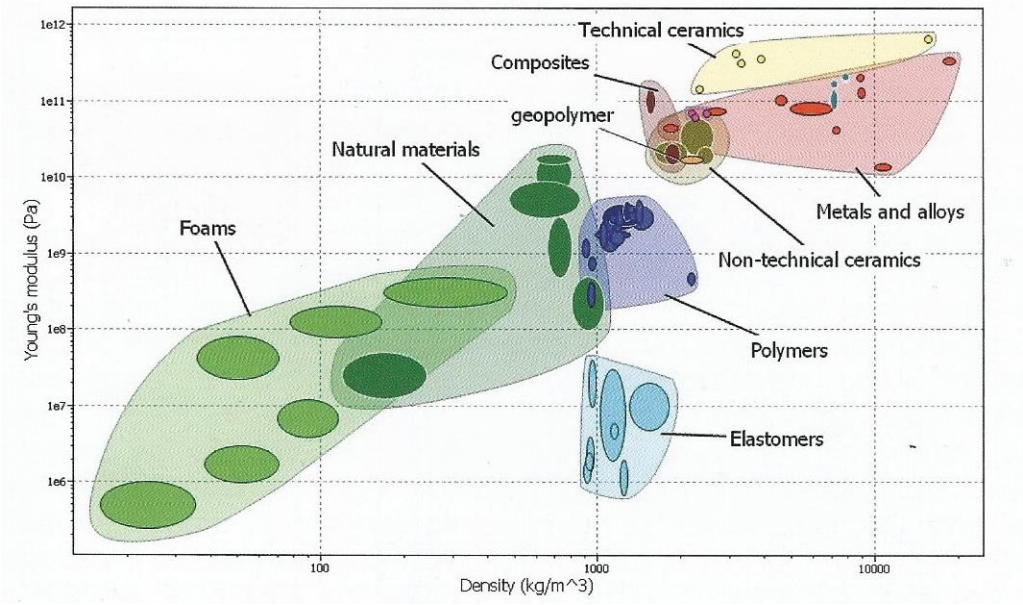


Figura 3.7 Diagrammi di Ashby rappresentanti le diverse classi di materiali in funzione del modulo elastico (Pa) e ρ (kg/m^3).

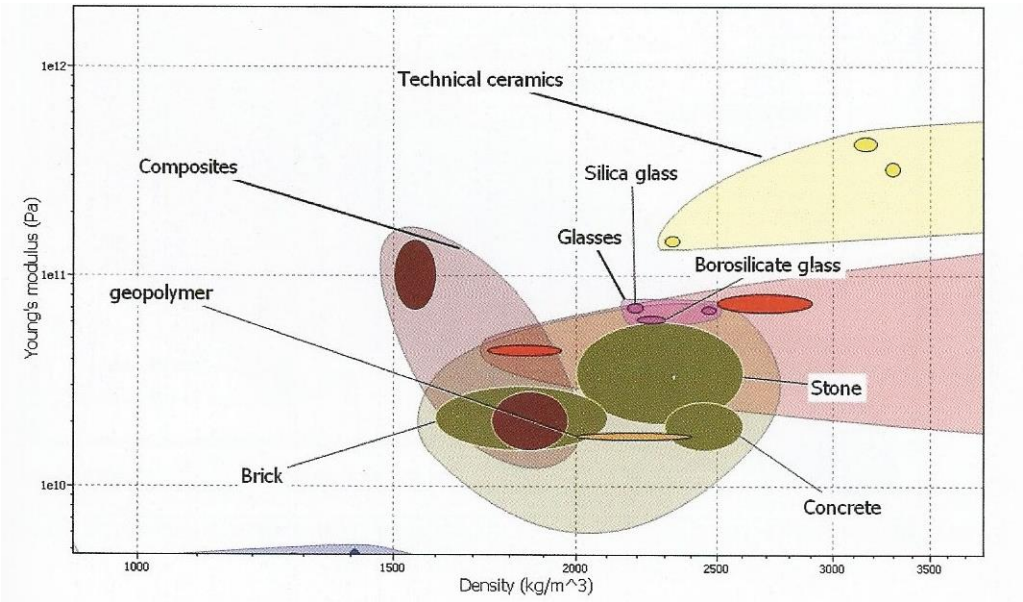


Figura 3.8 Zoom della figura 3.7.

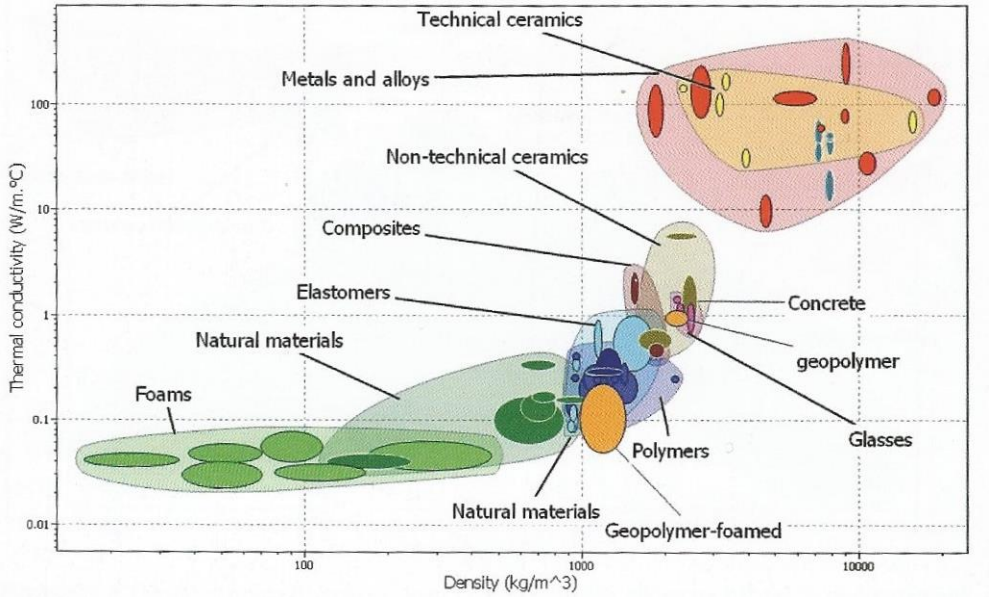


Figura 3.9 Diagrammi di Ashby rappresentanti le diverse classi di materiali in funzione di λ (W/m°C) e ρ (kg/m^3).

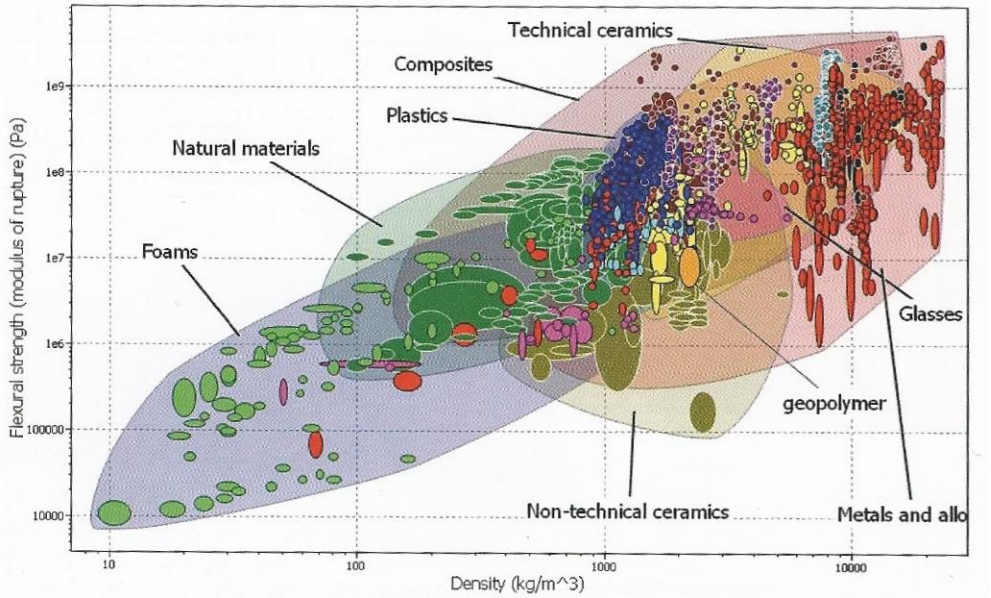


Figura 3.10 Diagrammi di Ashby rappresentanti le diverse classi di materiali in funzione del modulo di Rf (Pa) e ρ (kg/m^3).

La conducibilità termica λ è inversamente proporzionale alla capacità isolante del materiale, questo dato è un punto di forza per lo studio attuato in questa tesi d'esame poiché essendo il mio obiettivo finale quello di realizzare un elemento utile alla creazione di pareti verticali perimetrali, una bassa conducibilità termica comporta un soddisfacimento a livello termoigrometrico dell'ambiente indoor. In figura 3.9 possiamo infatti notare che materiali normalmente utilizzati nel campo dell'edilizia per isolare termicamente i manufatti architettonici, quali schiume e materiali naturali hanno una bassa λ e bassi valori di densità, invece materiali metallici, ceramici e compositi hanno valori di alta λ. Se l'utilizzo del geopolimero fosse finalizzato ad esempio ad isolare un edificio, questo digramma dimostrerebbe la superiorità isolante del geopolimero rispetto a un comune cemento o metallo utilizzati nelle normali tecniche costruttive per involucri esterni (facciate).

3.5 SOSTENIBILITA' AMBIENTALE DOVUTA ALL'USO DI GEOPOLIMERI

Il principio della geopolimerizzazione ha un campo vastissimo di applicazione e sperimentazione, è stato applicato dalle ceneri leggere alla caolinite calcinata, scorie d'alto forno, pozzolane e quant'altro. I geopolimeri sono stati anche definiti in letteratura, come "cementi alcalini", data la presenza di un ambiente alcalino molto aggressivo, sebbene vengano catalogati anche come "ceramiche consolidate per via chimica", essi posseggono molti vantaggi rispetto queste ultime, ad esempio il consolidamento in situ a moderate temperature, e l'assenza di tensioni dovute a raffreddamenti localizzati non uniformi. La figura di un professionista oltre tutte le conoscenze di cui deve disporre nella progettazione e corretta esecuzione, controllo di un edificio; ha l'importante dovere non solo etico ma a livello normativo di preoccuparsi di nuovi parametri come la " carbon footprint", ovvero le emissioni generate espresse in CO_2 equivalente in tutto il ciclo di vita di un prodotto edilizio, non solo quando lo possiamo osservare a lavoro finito ma tutto il procedimento connesso dalla sua realizzazione, lavorazione, trasporto atto alla lavorazione, trasporto sul cantiere, dismissione. I geopolimeri hanno una sostenibilità maggiore dei ceramici e dei cementi e inoltre una riduzione dei costi del 25-30%. La produzione del cemento Portland rappresenta il 74-81 % delle emissioni totali di CO_2 del cls, il contributo dei suoi aggregati si aggira attorno il 13-20 %. La produzione di una tonnellata di cemento Portland genera 0,55 t di CO_2 e 0,39 t di CO_2 dalla combustione di combustibili fossili per la cottura e macinazione del clinker per un totale di 0,94 t di CO_2. Questi valori tra la quantità di cemento prodotto e la quantità di emissioni prodotte sono quasi uguali, cosa davvero spaventosa se si pensa all'utilizzo di cemento nel mondo ad oggi. Una tonnellata di geopolimeri prodotti a partire da ceneri leggere libera solamente 0,16 tonnellate di CO_2, che potrebbero essere ridotte ulteriormente se si usassero attivatori alcalini di scarto.

3.6 MATERIE PRIME

Le materie prime utili al confezionamento di un materiale appartenente alla classe dei geopolimeri sono di tre tipi:

- La polvere allumino-silicatica reattiva, la quale viene utilizzata in contesti differenti a seconda dei caratteri morfologici, chimici e di reattività;
- La soluzione acquosa di idrossidi, formati da metalli, ossigeno, idrogeno, e/o silicati alcalini, prescelti in base al pH e alla loro reattività;
- Cariche e additivi aventi la giusta forma e natura chimica.

POLVERI ALLUMINOSILICATICHE, per far sì che la geopolimerizzazione arrivi a buon fine devono essere adoperate materie prime reattive, ovvero in grado di reagire velocemente quando entrano a contatto con altre sostanze, ad esempio le materie ricche di silicio come le ceneri volanti, la loppa d'altoforno, la pula di riso e le materie ricche di alluminio come invece le argille, caoliniti e bentoniti. I metacaolini detengono il primato in quanto i materiali più utilizzati presenti in letteratura, a cui seguono le ceneri di centrali elettriche a carbone e le scorie d'altoforno. La problematica inerente ai metacaolini è connessa alla loro superficie specifica poiché richiedendo molta acqua per la lavorabilità del prodotto, nella fase di stagionatura impiegano tempi prolungati e temperature intorno ai 60-80°C, per la totale rimozione dell'acqua che non è inclusa nella composizione del geopolimero. Le materie prime prodotte dalla lavorazione di scarti industriali richiedono tendenzialmente meno acqua e hanno di conseguenza una presa molto più rapida da renderli più adatti a questa lavorazione.

Figura 3.11 Campi applicativi e relative materie prime alluminosilicatiche, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati.

Ragionando sempre nei confronti dell'applicazione finale, molto importante diviene il valore del rapporto atomico tra alluminio e silicio, infatti:

- $1 < \frac{Si}{Al} < 3$, avremo delle polveri allumino-silicatiche ricche in alluminio, quali, metacaolino e ceneri volanti;
- $3 < \frac{Si}{Al} < 5$, componenti minerali delle rocce, feldspati, miche, caoliniti, attivati in specifiche condizioni data la loro scarsa reattività;
- $5 < \frac{Si}{Al} < 25$, pula di riso, il fumo di silice vengono adoperati per aumentare e cambiare questo rapporto.

POLVERI ALLUMINOSILICATICHE:
- Caolino calcinato
- Loppa d'altoforno
- Ceneri volanti
- Pozzolane

Caolino Calcinato o Metacaolino, già citato in quanto materia più reattiva alla geopolimerizzazione, grazie alle sue caratteristiche specifiche, bensì anche a processi previsti durante la sua lavorazione come la deidrossilazione, la quale inizia a temperature superiori ai 500°C, formando il materiale comunemente noto come metacaolino, che possiede un intervallo di stabilità compreso tra i 600-900°C. Questa lavorazione può essere svolta attraverso due metodologie la intra-inter/deidrossilazione il cui grado finale viene scoperto tramite la risonanza magnetica nucleare.
Loppa d'altoforno, sottoprodotto dell'industria siderurgica, durante la formazione della ghisa vi sono grandi quantità di scoria liquida tendenzialmente di composizione calcio-alluminosilicatica, all'uscita dall'altoforno viene raffreddata in modo brusco e trasformata in granuli porosi a struttura vetrosa, acquisendo proprietà idrauliche. Questi prodotti vengono conseguentemente macinati, ottenendo una polvere fine, altrimenti senza macinazione si comporterebbero come inerti. Le particelle di cui si compone il materiale sono irregolari e di dimensioni dei grani tra i 5 e 25 µm. In questo caso le differenze di reattività dipendono da parametri come la finezza del macinato, la distribuzione granulometrica e la quantità di fase vetrosa.
Ceneri volanti, utilizzate date le loro caratteristiche in contenuti di alluminio e silicio, vengono recuperate dalle centrali termoelettriche in seguito alla bruciatura del carbone polverizzato. L'elevata temperatura utile a formare suddette ceneri fa sì che esse siano costituite da impurità minerali presenti nel carbone le quali vanno a determinare delle celle cave di forma sferoidale. Presentano una struttura molecolare vetrosa, infatti sono stati inizialmente adoperati nella produzione del cemento Portland svolgendo un'attività pozzolanica e positiva nei confronti del comportamento reologico, e inoltre minimizzando le reazioni alcali-aggregato. Nella sua caratterizzazione la percentuale della silice occupa tra il 40-60% in peso e l'allumina il 20-30%, la restante parte è contraddistinta dal ferro i cui valori sono molto variabili. A seconda del contenuto di ossido di calcio le ceneri vengono catalogate in modo differente, infatti per un contenuto superiore al 20% la cenere rientra nella categoria dei materiali cementizi, altrimenti tra il 10-20% essa rientra tra quelli cementizi e pozzolanici. Importante sapere che la granulometria delle particelle della cenere volante è essenziale nell'acquisizione delle proprietà meccaniche finali, adoperando una dimensione inferiore a 45 µm si raggiungono 70 MPa in un solo giorno di maturazione.
Pozzolane, termine il quale indica quella categoria di materiale di piccola dimensione proveniente da eruzioni vulcaniche di tipo esplosivo, la cui struttura molecolare è tendenzialmente amorfa e costituita da silice. A

contatto con l'acqua in seguito a un'adeguata macinazione, assume un comportamento più prestante della calce stessa come ottimo legante idraulico. Viene adoperata in campo edilizio insieme al cemento Portland.

ATTIVATORI ALCALINI, quelli più comuni sono idrossidi, solfati, carbonati, silicati alcalini, silicati di sodio e potassio oppure piccole quantità di cemento clinker. I silicati alcalini sono noti per il vasto utilizzo nel campo commerciale in quanto detergenti, adesivi, sigillanti, vernici, cementi. Invece i silicati solubili si presentano inorganici, e aspetto molto positivo, quello che in seguito alla loro diluzione non vi è alcun impatto ambientale. Il tempo necessario all'indurimento di un materiale è inversamente proporzionale all'aumentare del pH, ecco perché quest'ultimo è davvero importante nell'influenzare e determinare la resistenza meccanica in un geopolimero.

CARICHE, gli impasti geopolimerici vengono utilizzati in edilizia o in settori caratterizzati da alte temperature come isolanti, le cariche sono importanti poiché assolvono le funzionalità come evitare il ritiro dovuto alla scomparsa dell'acqua nel materiale, migliorando le prestazioni meccaniche. Quelle maggiormente utilizzate sono le sabbie silicee che contengono quarzo e in cui la solubilità non influisce nel processo, esse devono presentarsi con tali caratteristiche:

- Devono essere compatibili termicamente con la materia prima geopolimerica utilizzata, onde evitare stress termici ad alte temperature.
- Devono presentarsi come inerti o quasi durante l'intero processo di geopolimerizzazione.

Le proprietà meccaniche sono influenzate dalla forma delle cariche stesse, le fibre, ad esempio, aumentano le prestazioni in termini di tenacità e resistenza meccanica mentre la natura chimica del materiale influisce sulle proprietà termiche e chimico fisiche.

3.7 LIFE CYCLE ANALYSIS PER LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE DEI GEOPOLIMERI

La produzione di materiali geopolimerici a partire da MPS (materia prima secondaria), o materiali naturali si è diffusa tramite numerosi studi e applicazioni in laboratorio e nella ricerca, bensì anche a livello semi-industriale. A differenza di tutti i materiali presenti oggigiorno in commercio, non possediamo un numero sufficiente di dati, atti a indicare il conseguente impatto ambientale dovuto al suo ciclo di vita. I materiali più simili per quanto concerne le applicazioni, e quindi competitors dei geopolimeri, sono i composti cementizi; sebbene degli altri materiali siamo in possesso di più dati statistici e normativi non è così semplice e immediato delineare un'unica soluzione in grado di soddisfare tutti i requisiti di sostenibilità, bisogna riferirsi ad un approccio di natura scientifica che consenta di realizzare analisi individuali e mirate alla singola applicazione. La scelta nella progettazione dei materiali si è sempre concentrata su aspetti precisi come la resistenza a trazione e compressione, il costo, la facilità e velocità di posa…trascurando tematiche essenziali coerenti a una progettazione sostenibile; quali:

- Ottimizzazione nel risparmio energivoro causato nei processi produttivi;
- Riduzione del consumo di materie prime;
- Riciclaggio, reimpiego di sottoprodotti e rifiuti di altri processi industriali.

Nell'ambito dei composti cementizi al fine di perseguire un processo sostenibile vi sono tre categorie da considerare, così come si può notare in Fig. 3.12:

- Gli aggregati hanno un peso non indifferente poiché costituiscono la maggior parte del composto, hanno varie funzioni tra le quali quella di stabilità volumetrica e quella di riduzione dei costi;
- I sistemi leganti hanno la funzione di matrice del composto e a seconda delle applicazioni variano dal punto di vista chimico e costituzionale.
- Le fibre, sempre a seconda del campo di applicazione, consentono di ottenere compositi fibro-rinforzati contraddistinti da ottime prestazioni meccaniche.

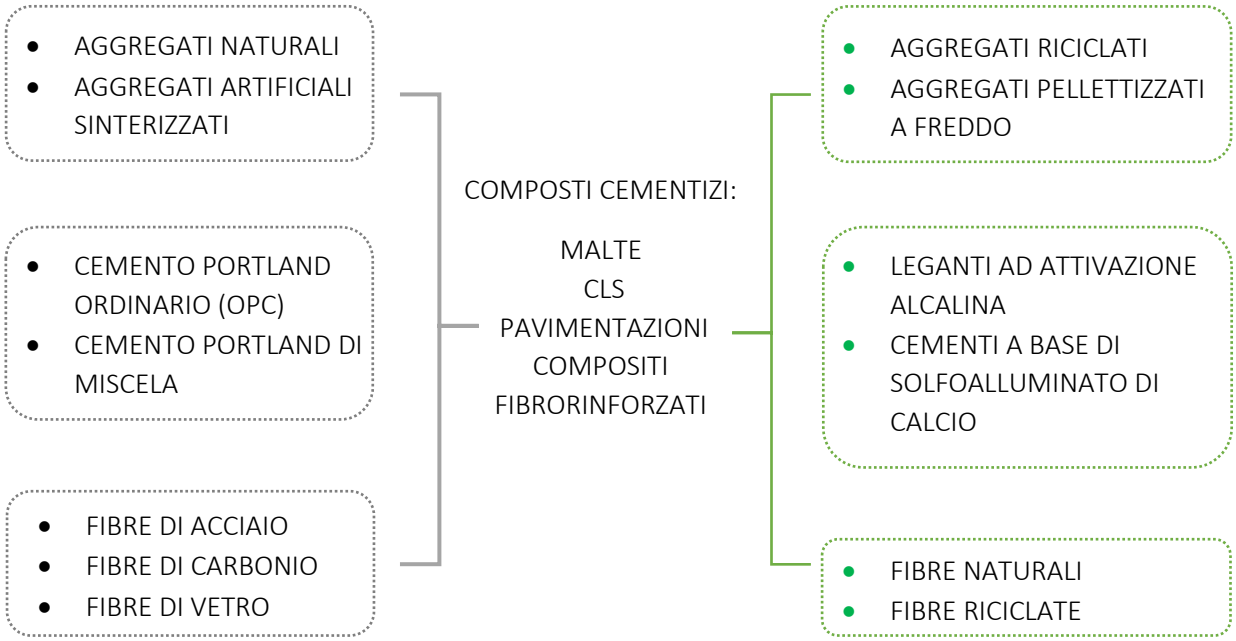


Figura 3.12, Componenti dei compositi cementizi in uno schema di progettazione orientato alla sostenibilità, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati.

Sul lato destro troviamo i materiali di rimpiazzo a quelli soliti, i quali seguono il filone della sostenibilità. I leganti sono quelli che possono essere sostituiti dai geopolimeri, rientrando nella categoria dei materiali ad attivazione alcalina. I cementi a base di solfo alluminato di calcio sono classificati in quanto leganti idraulici aventi un impatto ambientale inferiore rispetto al cemento Portland, la sua sintesi avviene a una temperatura di 1250-1350°C, valori che rispetto alla produzione di geopolimeri ci mostrano subito quale materiale alternativo sarebbe meglio utilizzare. A livello di dati disponibili vi sono documenti che confrontano l'emissione di anidride carbonica dovuta dalla produzione di cls tradizionali a base di cemento Portland e cls aventi legante geopolimerico, con dati compresi tra il 20% e un lungimirante 80%. Valutar l'impatto ambientale dovuto dalla produzione industriale di un nuovo materiale è un'azione molto ardua in cui non basta osservare solamente le emissioni di CO_2, ma bisogna considerare tantissimi aspetti. L'approccio maggiormente utilizzato per valutare in maniera accurata e scrupolosa l'impatto ambientale di prodotti e processi è applicare l'intera analisi del ciclo di vita detta per l'appunto "Life Cycle Analysis" (LCA), la quale analizza prodotti e servizi considerandone anche l'aspetto relativo ai costi (Life Cycle Cost, LCC). Gli studi presenti in letteratura sino ad oggi, sulla LCA dei materiali geopolimerici non sono da considerarsi ancora pienamente conclusi ed esaustivi poiché incentrati solo sul consumo di materie prime ed energia.

LIFE CYCLE ANALYSIS, la LCA valuta l'impatto ambientale di processi o prodotti considerandoli in tutta la loro vita utile, un approccio dalla culla alla tomba, ovvero considerare tutte le fasi riguardanti uno specifico materiale. Per ognuna delle fasi di vita, dall'approvvigionamento delle materie prime, il trasporto, la produzione e posa in opera, allo smaltimento o riutilizzo, bisogna definire tali caratteri:

- I bilanci energetici e di materie prime;
- Le emissioni nocive in acqua, aria e suolo;
- Le quantità di rifiuti generate;
- Possibilità di riutilizzare e riciclare i prodotti di scarto, e le condizioni di smaltimento dei rifiuti.

Aspetto di rilevante importanza è quello di concepire il prodotto edilizio come un sistema concatenato di processi scanditi da input, quali materie prime, energia e semilavorati e output come emissioni, scarti, rifiuti e

prodotto ultimato. La norma descrittrice di suddetta analisi può essere spiegata attraverso quattro caratteristiche.

Fase 1: obiettivi e scopi, durante la fase di definizione degli obiettivi, vengono scelte le finalità dell'analisi e della valutazione, l'unità funzionale, i confini del sistema e le cut-off rules che si intendono analizzare. In questo modo si dichiara il grado di precisione minimo di cui si ha bisogno e la determinazione del criterio di studio delle singole parti del ciclo di vita.

Fase 2: analisi di inventario, si ricostruiscono i processi sequenziali che contraddistinguono un sistema produttivo, gli input ovvero le materie prime e l'energia adoperate e gli output invece le emissioni prodotte.

Fase 3: analisi degli impatti, elaborazione dei dati relativi ai rilasci in ambiente e al consumo di materia prima. Questa analisi comporta un passaggio da studio oggettivo, ad un giudizio di compatibilità ambientale basato su elementi conoscitivi, aggiornati nel corso degli anni e soggetti a variazioni sistematiche. Gli studi ci mostrano come l'impatto ambientale verta intorno alle seguenti tematiche:

- Cambiamenti climatici, GWP, (Global Warming potential) è un indice dovuto alle emissioni di GES (Gas responsabili dell'Effetto Serra) che assorbono la radiazione infrarossa riflessa dalla terra. Un valore commisurato a quello della CO_2, ad esempio un altro gas noto per essere uno dei maggiori principali responsabili dell'effetto serra è il metano CH_4, il quale possiede un GWP pari a 23. Questo significa che una molecola di metano contribuisce al riscaldamento globale come 23 molecole di CO_2;
- Diminuzione di risorse, ADP, (Abiotic depletion potential), parametro rappresentante tutte quelle risorse che non possono essere rigenerate poiché non rinnovabili, la sua unità di misura è espressa in kg di antimonio equivalenti;
- Acidificazione, (Acidification potential-AP) si misura in termini di kg di SO_2 equivalente, ovvero l'anidride solforosa. Si crea quando le emissioni di zolfo e di ossidi di azoto reagiscono in atmosfera con il vapore acqueo e formando acidi che giungono sino al suolo attraverso le piogge e tutti i fenomeni connessi;
- Eutrofizzazione, (Eutrophication potential-EP), fenomeno il quale rappresenta l'aumento nell'acqua di sostanze nutritive, soprattutto costituite di azoto e fosforo, che a loro volta facilitano una produzione di alghe andando a creare squilibri in altri organismi;
- Riduzione di ozono, (Ozone depletion potential-ODP), indica quali sostanze fanno sì che si riduca lo stato di ozono stratosferico con conseguente immissione della radiazione UV che arriva sino al suolo.

Fase 4: interpretazione dei risultati, individuazione di punti critici del processo produttivo con eventuali cambiamenti necessari per ridurre l'impatto energetico/ambientale. Questa fase include un controllo di consistenza, un'analisi di sensitività, e un controllo di completezza.

LIFE CYCLE ANALYSIS PER MATERIALI GEOPOLIMERICI, la seconda fase quella di analisi di inventario solitamente si appoggia a innumerevoli fonti, per definire le diverse categorie di impatto date dai materiali, come ad esempio il database Ecoinvent, il quale fornisce dati aventi basi scientifiche. Per quanto concerne la valutazione dell'impatto ambientale la metodologia CML[15] prende in considerazione diversi fattori di impatto ambientale, tra quelli precedentemente citati, i più importanti sono il GWP e l'ADP. Le materie prime di cui possono essere costituiti i geopolimeri sono tantissime, e proprio il tipo di elemento che le contraddistingue che andrà a determinare la sua lavorabilità e proprietà allo stato concluso. La prima differenza che si può evidenziare è nell'utilizzo di materie prime naturali, ad esempio il più utilizzato è il metacaolino, rispetto le MPS contraddistinte da un minor consumo di risorse.

[15] CML, Centrum voor Milieukunde Leiden, istituto della Facoltà di Matematica e Scienze Naturali dell'Università di Leida il quale include nei parametri da considerare la domanda cumulativa di energia espressa in mega Joule.

MATERIALE	Geopolimeri, GA		Geopolimeri, GB	
	% Peso	% GWP	% Peso	% GWP
Aggregati	78	7	67	1
Ceneri volanti	2	-	13	4
Scorie	12	13	-	-
Acqua	4	-	7	-
Soluzione di silicati	2	60	9	73
NaOH	2	20	1	4
Metacaolino	-	-	3	18

Tabella 8, contributo al GWP di due diversi sistemi geopolimerici, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati.

In Tab. 8 possiamo subito confrontare i due geopolimeri A e B, in cui:

- Sebbene vi sia una grande % in massa di aggregati come sabbia e ghiaia, questi non vanno ad influenzare il valore del GWP finale;
- Le ceneri volanti hanno dei valori non influenti per la determinazione dell'anidride carbonica equivalente;
- Le scorie d'altoforno contribuiscono alla determinazione del GWP;
- La soluzione di silicato è il dato più importante nello studio poiché è quello determinate delll'impatto ambientale di entrambe le miscele;
- Anche l'idrossido di sodio determina una quota interessante del GWP finale;
- L'uso del metacaolino aumenta significativamente il GWP.

Possiamo dedurre in tal modo, che l'uso di idrossido di sodio e di silicato di socio dovrebbe essere sostituito o comunque contenuto, con **attivatori alcalini environmentally friendly**; ed inoltre di preferire al metacaolino scarti industriali opportunamente trattati.

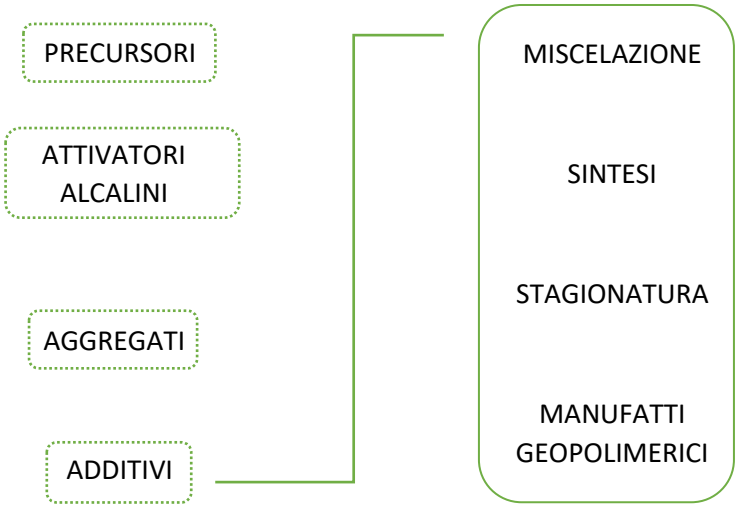


Figura 3.13, Confini del sistema per la valutazione dell'impatto ambientale delle materie prime, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati, diagramma rielaborato personalmente.

La produzione del geopolimero ha un suo peso sull'impatto ambientale generato dall'intero ciclo di vitta del prodotto, possiamo suddividere i passaggi rappresentati in Fig. 3.13 in due step il primo la miscelazione dei diversi componenti e successivamente la stagionatura che in base alla composizione chimica varia nelle temperature. Alcuni preparati geopolimerici non hanno alcun bisogno dell'uso della stufa per poter stagionare, lo fanno da soli esposti a una temperatura ambiente, quelli in cui vengono utilizzate le scorie d'altoforno, solamente dopo alcune ore mostrano già le proprietà desiderate, altri, come quelli con l'uso di

ceneri volanti, ricorrono all'uso della stufa per poter essiccare e ottenere i risultati sperati, solitamente con temperature comprese tra i 20 e 80°C. Eseguire un'analisi del ciclo di vita, LCA, durante la realizzazione di un geopolimero e confrontarla ai dati che possediamo dei materiali più utilizzati oggi sul mercato edile, è un'azione indispensabile per ottimizzare le criticità di un materiale o evidenziare i punti di forza di un altro. Per questi materiali geopolimerici purtroppo non abbiamo dati in riferimento alle tempistiche di durabilità e manutenzione, poiché il campo di applicazione è ancora molto ridotto, dunque bisogna tenere conto di questa informazione nell'analisi perché risulta un dato indispensabile per stabilire l'impatto ambientale finale. Invece per quanto concerne la scelta delle materie prime, così come nella suddetta tesi sperimentale, l'utilizzo di MPS, al posto di materie prime rappresenta un punto di forza poiché risparmio di materia bensì anche un punto da controllare poiché la composizione chimica di questi materiali è più elaborata e in alcuni casi può contenere tracce di metalli pesanti con conseguenze molto negative sull'intero impatto ambientale.

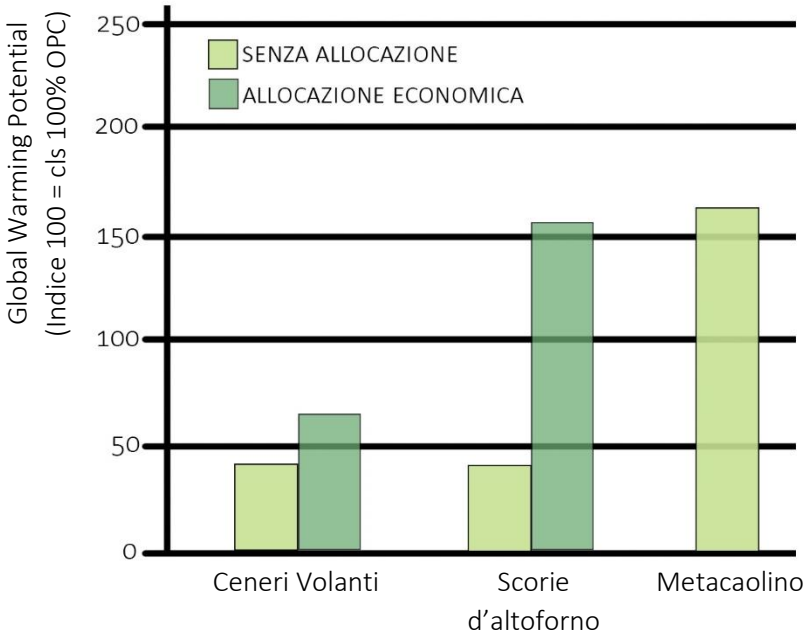


Figura 3.14, Impatti ambientali di miscele geopolimeriche realizzate con diversi precursori solidi, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati, diagramma rielaborato personalmente.

L'istogramma in Fig. 3.14 mostra i risultati di un recente studio in cui al variare della MPS utilizzata, ovvero allo scarto industriale recuperato da un determinato tipo di produzione, viene associata un'aliquota corrispondente al contributo ambientale prodotto dal materiale in questione prima di essere utilizzato come MPS per un nuovo impiego, ovvero un GWP prodotto ascrivibile al processo industriale primario. Le constatazioni desumibili da tale diagramma sono le seguenti:

- Nel caso delle scorie d'altoforno vi è una triplicazione del GWP, in cui si può subito desumere che il contributo ascrivibile al processo industriale primario del materiale è molto impattante sul risultato finale;
- L'allocazione economica desunta dalle ceneri volanti ci mostra invece quanto sia più trascurabile l'aumento del GWP finale, poiché molto contenuto;
- Il metacaolino non ha la rappresentazione dell'allocazione economica poiché le argille calcinate non vengono considerate sottoprodotti industriali e dunque vengono analizzate in quanto materie prime;
- Le scorie d'altoforno presentano senza considerare alcuna allocazione, valori simili a quelli delle ceneri volanti che invece cambiano decisamente rotta quando l'allocazione economica viene citata, andando a raggiungere quasi i valori del metacaolino, un dato molto importante per comprendere quanto sia necessaria la considerazione di questa aliquota all'interno della valutazione di una corretta LCA.

Nella seguente tabella vengono elencati gli interventi utili alla riduzine dell'impatto ambientale dovuto all'impiego del tradizionale cemento Portland nella produzione del cls.

Tipologia di intervento	Esempio	Stima della riduzione di impatto, %
Cambio combustibile	Evitare combustibili fossili	10÷70%
Progettazione nuovi forni di cottura	Recupero di calore, cattura CO_2	10÷90%
Incremento efficienza	Processo a secco	10÷20%
Uso di aggiunte pozzolaniche	Impiego di ceneri volanti, scorie d'alto forno	20÷80%
Uso di leganti alternativi	Cementi geopolimerici	40÷80%
Uso di aggregati artificiali	Impiego di rifiuti da costruzione demolizione, scorie industriali	5÷10%
Miglioramento progettazione architettonica e strutturale	Ridurre quantità di calcestruzzo messo in opera	15÷30%

Tabella 9, principali interventi per ridurre l'impatto ambientale delle opere in cls, Fonte, Libro Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati.

In conclusione, di suddetti ragionamenti i progettisti o tutti i professionisti coinvolti, dovrebbero accrescere le competenze e conoscenze atte a progettare in modo tale da minimizzare l'impatto ambientale dovuto dal settore delle costruzioni, quindi sviluppando l'uso di nuovi leganti più sostenibili dei competitors oggi presenti sul mercato. In vista al miglioramento delle miscele geopolimeriche bisognerebbe ridurre il più possibile l'uso di soluzioni di silicati e idrossido di sodio (NaOH), favorendo l'utilizzo di materie prime solide di scarto da lavorazioni industriali, ed inoltre tener conto della stagionatura a caldo poiché nonostante si utilizzino basse temperature rimane sempre un passaggio impattante per l'ambiente. La conoscenza dei dati di impatto relativi a ogni singola fase del processo di produzione di un materiale, stimabile attraverso uno strumento come l'analisi LCA, permette di migliorare quelle fasi in cui l'impatto ambientale risulta meno contenuto, dunque l'analisi LCA assume un ruolo fondamentale nel confronto in termini eco-sostenibili tra sistemi che posseggono magari già elevate differenze in termini economici di costo di produzione ed esercizio.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA CAPITOLO 3: GEOPOLIMERI

- CRISTINA LEONELLI, MARCELLO ROMAGNOLI, *Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati,* Bologna, seconda edizione, I. Cer. S. 2013

4. ATTIVITA' IN LABORATORIO

Nel mese di aprile 2019 ho iniziato lo sviluppo della seguente tesi, dapprima facendo una ricerca sulla letteratura presente e disponibile in biblioteca di architettura presso il Castello del Valentino, ho visionato le tesi sviluppate negli anni precedenti e in particolar modo cercato di comprendere articoli scientifici di riviste come quelli indicizzati dalle banche dati Scopus oppure Web of Science. In seguito, è iniziata un'attività sperimentale di ricerca all'interno del laboratorio DISAT del Politecnico di Torino, Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia, con l'aiuto costante dei Professori Jean Marc Tulliani, Marco Zerbinatti e dell'ingegnere Alberto Belli abbiamo iniziato a sperimentare e testare l'uso di questo fango di segagione per l' ideazione di un prodotto edilizio che fosse in linea con i principi di sostenibilità che mi ero proposta di raggiungere, passando dalla definizione di rifiuto a quella di reimpiego, attraverso uno studio più accurato come quello della tesi.

4.1 RIFERIMENTI IN LETTERATURA

Così come è stato precedentemente accennato sullo studio e interesse diffuso negli ultimi anni riguardo l'uso di prodotti derivati dallo scarto del taglio delle rocce, è stato possibile, in una fase iniziale di ricerca e comprensione del tema da sviluppare nella tesi di studio in questione, affidarsi ad articoli scientifici e tesi, in cui l'argomento era stato affrontato anche se con obiettivi e metodologie differenti, ma pur sempre punti di partenza utili ed essenziali ad un approccio sperimentale al tema. Dall'articolo *"Valorisation of alumino-silicate stone muds: From wastes to source, materials for innovative alkali-activated materials";* si evidenzia immediatamente una problematica connessa allo smaltimento dei rifiuti prodotti dall'estrazione e trasformazione delle pietre naturali, a partire dai relativi costi, il danneggiamento ambientale non solo della flora e della fauna ma anche della salute e benessere dell'uomo. Si introduce la tematica del reimpiego e come questi fanghi composti di quarzo, feldspati, dolomite, e biotite possano essere adoperati nella produzione di materiali alcalino-attivati secondo lavorazioni semplici e innovative, in cui la miscela di fango e soluzione alcalina vengono lavorate e colate in stampi, successivamente fatti stagionare a 80°C in stufa per 48 ore. La produzione di cemento Portland come già descritto nell'introduzione di suddetta tesi, produce inquinamento ambientale da contenere con l'ideazione di nuovi materiali che siano meno impattanti sull'ecosistema. La letteratura che si può trovare in merito ai geopolimeri, meglio identificabili a seconda delle caratteristiche come "materiali attivati da alcali", verte sull''uso di due componenti principali la loppa d'altoforno e le ceneri volanti, materiali sui quali possediamo più dati rispetto ai fanghi di segagione. Lo studio in questione ricicla un fango derivato dal taglio del granito, prodotto in cave situate in Piemonte, Italia, nel Verbano Cusio Ossola. Aspetto interessante dell'articolo è che il fango in questione a differenza della letteratura che si può scovare nelle altre riviste scientifiche, ha un ruolo non da filler/riempitivo bensì da costituente attivo, il quale una volta miscelato alla soluzione alcalina viene messo in stufa a 80°C per uno o due giorni consecutivi. La composizione chimica del fango è stata desunta dall'analisi di fluorescenza X (XRF), in cui nella colonna del peso percentuale attribuibile ai singoli costituenti hanno un maggior rilievo la silice, la quantità di anidride carbonica e di ossidi in particolare di calcio e alluminio. Un'altra azienda sul territorio Piemontese, nota come Minerali Industriali S.r.l. avente sede a Novara, ha fornito un altro materiale, una MPS (materia prima secondaria), ovvero una polvere emessa durante la lavorazione del granito per il mercato della porcellana, la cui composizione in peso percentuale è prevalentemente costituita da silice e ossido di alluminio. Per ottenere una struttura porosa viene utilizzata l'H_2O_2, nota come acqua ossigenata in quanto agente schiumogeno, metodologia la quale si andrà a riprovare anche durante la tesi in questione. La preparazione della miscela, in questo caso studio, prevedeva per la preparazione del silicato di sodio, l'uso di idrossido di sodio (NaOH) dissolto in H_2O. Di seguito venivano aggiunte nano polveri di silice amorfa sotto agitatore magnetico, per un periodo di tempo di 24h. L'impasto finale è dato dalla miscelazione dei fanghi con la MPS, prima citata, e silicato di sodio per 15 minuti. Metodologie utili allo studio svolto nella tesi in questione, le quali sono state assimilate da questo articolo, sono state ad esempio nella produzione di geopolimeri avente carattere poroso, prendendo come riferimento la percentuale in peso dell'H_2O_2 e la temperatura a cui sottoporlo in stufa, ovvero una prima mezz'ora a 50°C

lasciandolo stagionare per 24 h a 80°C. In conclusione, allo studio di riferimento si sostiene che il lavoro prodotto riveli un rifiuto possibilmente utilizzabile per produrre materiali attivati da alcali, differendo dai geopolimeri in parte a causa della struttura molecolare, né amorfa né semicristallina, bensì propriamente cristallina, tramite processi semplici e aventi un impatto energivoro ridotto, dovuto alla temperatura di cottura. I risultati suggeriscono un possibile uso di tale processo nella produzione di manufatti edilizi densi e alleggeriti evitando la fine del fango in discarica e un approccio salutare, ambientalmente ed economicamente responsabile. In Tab. 10,11,12 è possibile vedere i riferimenti da cui si è partiti per stabilire a livello di peso % il mix design utilizzato.

COMPOSTO CHIMICO	%
Silicato di Sodio Ingessil	81,2
Pellets NaOH	9,4
Acqua	9,4

Tabella 10, rapporti molari della soluzione attivante, Fonte articolo sopracitato (paragrafo 4.1)

	Soluzione C13 standard	Soluzione Ingessil + NaOH
$H_2O/NaOH$	13	16,8
SiO_2/Na_2O	9,4	1,85

Tabella 11, formulazioni di partenza e considerazioni preliminari, Fonte articolo sopracitato (paragrafo 4.1)

	Pasta PL50N (%wt)	Pasta PCSL50N (%wt)
Fango CSL	-	65,23
Fango di Luserna	65,23	-
Silicato di Sodio	28,25	28,25
NaOH 50%	6,52	6,52
Acqua aggiunta	-	-

Tabella 12, formulazioni base delle paste con fango di Luserna e CSL, Fonte articolo sopracitato (paragrafo 4.1)

4.2 MIX-DESIGN

Trovare il corretto mix-design per la preparazione della miscela non è stato veloce e definitivo ma sono state necessarie diverse prove. All'inizio non avevamo ancora in mente che genere di prodotto finale avremmo ottenuto, la forma o la funzione specifica, l'obiettivo principale era quello di progettare un prodotto edilizio possibilmente per la realizzazione di pareti verticali esterne, che avesse funzione portante e alternativa alle normali tecniche costruttive. La prima miscela utilizzata al fine di ottenere un materiale alcali-attivato, prevedeva solamente l'utilizzo della soluzione attivante composta da soluzione di acqua e idrossido di sodio, miscelata a silicato di sodio e infine unita al fango di segagione. In Tab. 14 possiamo vedere i valori equivalenti dedotti dal caso studio in Tab.10.

	Ingrediente	Frazione in peso
Componenti liquide	NaOH (soluzione acquosa al 50% in peso)	35%
	Soluzione di Silicato di Sodio	
Componenti solide	Fango di segagione	65%

Tabella 14, Prima miscela oggetto di studio, ingredienti costituenti e percentuali in peso.

Come si evince nel paragrafo 4.6 la miscela iniziale ha subito dei cambiamenti, poiché dai primi provini realizzati abbiamo potuto subito constatare, già solamente a livello visivo e tattile, che il prodotto finale non fosse in grado di soddisfare le nostre esigenze. Prima di raggiungere la miscela finale, abbiamo sperimentato l'aggiunta di altre componenti solide quali, la loppa d'altoforno per verificare le migliori proprietà finali come letto in letteratura, l'argilla e infine il cocciopesto. Per non ripetere risultati già noti in campo applicativo con la Loppa d'altoforno, oppure risultati incoerenti ai principi di sostenibilità prefissati come l'argilla cotta (metacaolino), la soluzione finale ha visto protagonisti il fango e il cocciopesto due sottoprodotti, il primo dal taglio delle rocce e il secondo dai rifiuti di costruzione e demolizione, in particolare dalla frantumazione di

laterizi come tegole e mattoni, i quali grazie alla presente proposta possono ora e in futuro conferire in attività differenti alla discarica, materiali che possono assume a fine vita un'accezione differente, eco-friendly nei confronti del nostro habitat.

4.3 ANALISI EFFETTUATE

Al fine di comprendere al meglio il materiale oggetto di studio, abbiamo eseguito delle analisi di supporto alla fase sperimentale in laboratorio. La prima è stata la **granulometria**, una caratteristica fondamentale delle polveri reattive nella determinazione delle proprietà finali del geopolimero.

Figura 4.1, Mastersizer3000 Malvern, analizzatore delle dimensioni delle particelle, strumentazione utilizzata presso laboratorio DISAT, Politecnico di Torino, fotografia autoprodotta.

Abbiamo mischiato il fango con etanolo per vedere quanto si disperdesse e prima di inserirlo nel granulometro, l'abbiamo messo nel sonicatore in modo tale da velocizzare il processo di dispersione del solido nel solvente, in questo caso, del fango nell'etanolo. Successivamente il fango è stato inserito nel granulometro Mastersizer3000 (fig. 4.1), il quale determina misurazioni precise in un tempo rapido, di particelle che vanno da pochi nanometri a qualche millimetro, attraverso la tecnica della diffrazione laser in cui un raggio laser passa attraverso il materiale disperso in un liquido e viene misurata la luce diffusa presente in quel momento. Questo sistema di misurazione si articola in tre elementi principali, il primo il **banco ottico,** un'area delimitata dove avviene la misura attraverso il passaggio del laser, il quale illumina la particella rivelando la misura esatta della luce diffusa dalle particelle all'interno del campione oggetto di verifica, in base a caratteristiche numerose che vanno dalla lunghezza d'onda della luce rossa a quella blu e gli svariati angoli presenti. Il secondo componente è rappresentato dall'**unita di dispersione del campione,** la quale avviene in modo controllato da una varietà di unità, le quali possono essere a secco oppure a umido, quando le particelle arrivano sino all'area delimitata del banco di dispersione, debbono essere nella giusta concentrazione e disperse in modo adeguato e stabile, quest'unità ha proprio tale obiettivo. Infine, l'ultimo componente è un **software**, quest'ultimo verifica la correttezza di tutte le azioni costituenti il processo di misurazione, analizzando successivamente i dati di scattering al fine di calcolare la distribuzione delle dimensioni delle particelle, fornendo in modo immediato i risultati finali.

Un' altra analisi effettuata è stata la **Diffrattometria a raggi X** (DRX), il macchinario (fig. 4.2, 4.3) emette i raggi X e in base all'incidenza di questi sui cristalli della struttura del campione, produce uno spettro di diffrazione, ovvero una curva che mostra dei picchi di diffrazione in base all'angolo che il materiale analizzato forma con il

fascio incidente di raggi X. In questo modo attraverso l'uso del software High Score Plus è stato possibile ricavare a livello qualitativo, piuttosto che quantitativo, la tipologia di minerali presenti all'interno del fango di segagione analizzato. L'analisi dell'XRD permette l'individuazione delle fasi cristalline, tramite la diffrazione dei raggi X ed è basata sulla legge di Bragg. Il campione viene fatto ruotare, esso risulta composto da diversi piani atomici paralleli, i quali allorquando l'onda elettromagnetica incide su di essi, genera un fenomeno di interferenza dovuto alle riflessioni delle onde degli innumerevoli piani cristallini, Bragg riassume questo fenomeno nel 1913 nella seguente legge:

$$2dsen\theta = n\lambda$$

d = distanza tra due piani adiacenti
θ = angolo formato dal fascio uscente con il piano cristallino
λ = lunghezza d'onda del raggio X incidente
n = numero intero positivo

Figura 4.2 - 4.3, PW3830 X-RAY generator Philips, strumentazione utilizzata presso laboratorio DISAT, Politecnico di Torino, fotografie autoprodotte, a sinistra visione completa dello strumento a destra zoom dell'interno.

All'interno del macchinario vi sono:

- Un emittore di raggi X monocromatici aventi λ fissa;
- Un porta campione;
- Un detettore di raggi X diffratti.

La sorgente emettitrice delle radiazioni è impostata su di un braccio mobile (Fig. 4.3), descrivendo durante la prova un percorso semicircolare, i vari parametri come l'angolo di inizio e fine misura posso essere impostati dall'utente, oppure lo step angolare il quale intervalla ogni rilevamento. A livello pratico si è frantumato il fango di segagione utilizzando un mortaio e un pestello di agata e successivamente si è compressa la polvere in un cilindretto sottile inserito all'interno del diffrattometro, (Fig. 4.4 - 4.5).

Figura 4.4 - 4.5, A sinistra strumento in cui viene compressa la polvere, a destra zoom dell'inserimento nel macchinario

4.4 MATERIE PRIME

All'interno del seguente paragrafo si possono conoscere le materie prime utilizzate e i risultati delle prove precedentemente citate.

L'idrossido di sodio NaOH, prodotto e acquistato dall'azienda Alfa Aesar, in forma di piccoli grani. La sua densità è di 2,13 g/cm^3, valore utile durante le attività sviluppate in laboratorio, e nella scelta dei contenitori da utilizzare dati i passaggi di scala da provini minori allo sviluppo finale.

Il silicato di sodio Ingessil, prodotto fornito dalla Ingessil s.r.l.

Fanghi di segagione, forniti dal Centro Servizi Lapideo del VCO (Verbano Cusio Ossola), catalogati in quanto fanghi di segagione.

Figura 4.6, Foto autoprodotta relativa al Fango di segagione.

Cocciopesto, fornito da Sinopia s.a.s, polvere fine (0-1mm) di cocciopesto ottenuta da mattoni e tegole frantumati, indicata per la preparazione di malte traspiranti.

Argilla, O/AR Fondat Lozzolo.

Loppa d'altoforno, fornita dal DISAT.

Nell'analisi XRD effettuate abbiamo riscontrato la presenza di Quarzo, Albite, Flogopite, Clorite, Calcite, Ortoclasio e Zeolite. In Fig. 4.7 ho rielaborato il diffrattogramma ottenuto dall'analisi, in cui sull'ascissa si individua la posizione angolare del picco mentre sull'ordinata è possibile osservarne l'intensità; l'analisi degli XRD è avvenuta andando a capire quali fossero i minerali generatori dei picchi presenti, bensì non essendo un'analisi quantitativa ma qualitativa non andrò a specificarne il peso percentuale relativo al campione

analizzato. Nel digramma autoprodotto sottostante al diffrattogramma, è stata resa più diretta la lettura riferita alla presenza dei minerali prima citati e alla loro collocazione circa l'asse delle ascisse, la quantità di quadratini non è rilevante a livello quantitativo bensì rappresenta un'approssimazione collegata all'intensità, più quadratini dello stesso colore rappresentano un minerale che in una posizione angolare assume un'intensità più rilevante.

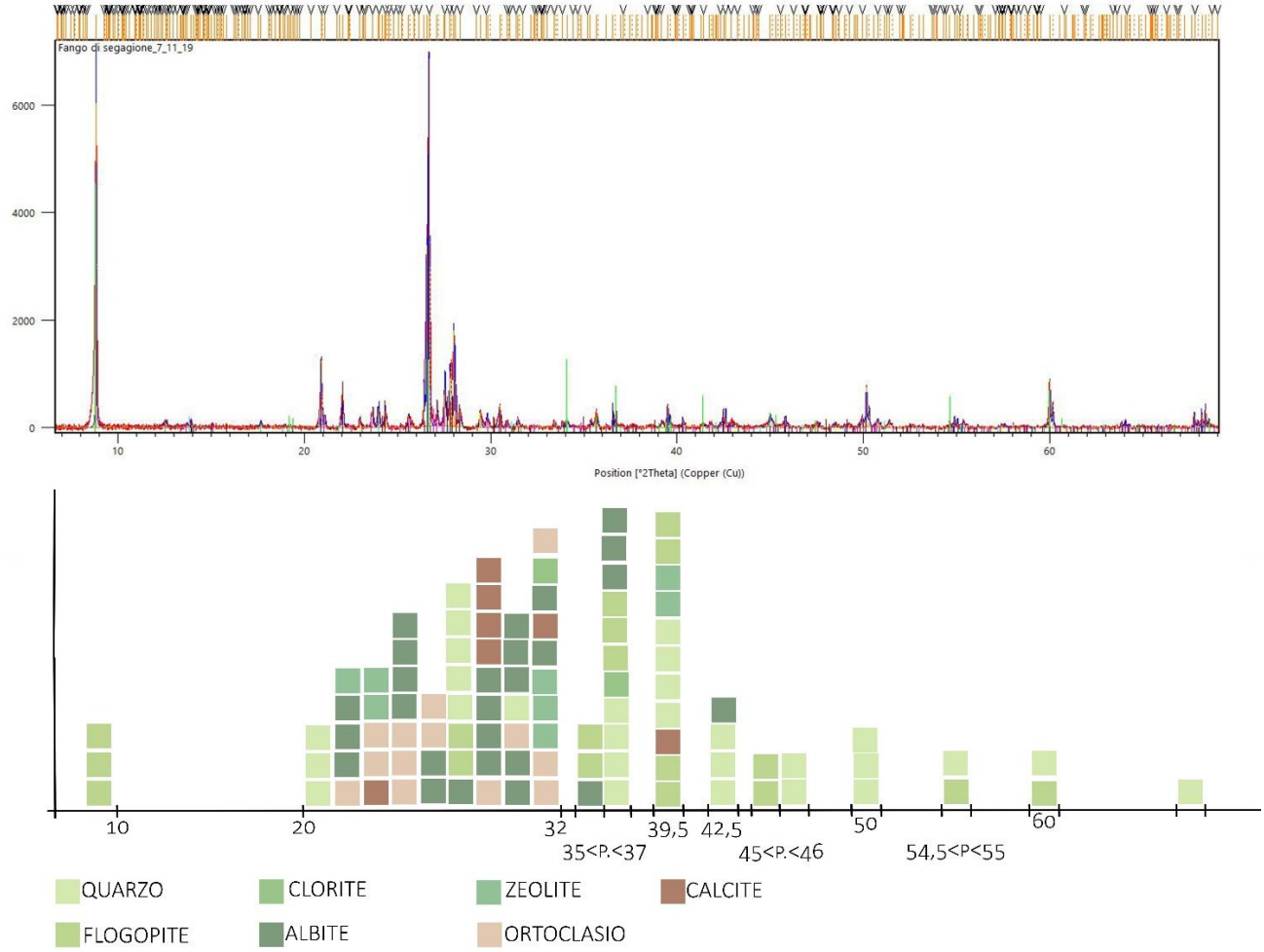
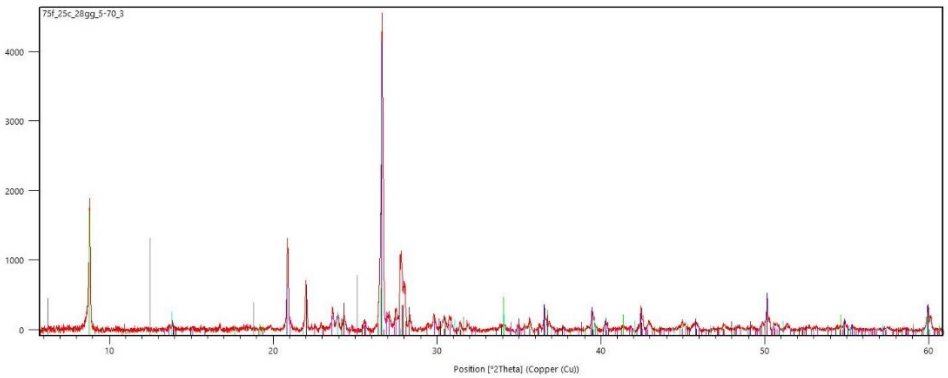


Figura 4.7, In alto diffrattogramma del campione di Fango tal quale, in basso uno schema concettuale in delayering dove sono stati collocati con colori diversi i vari minerali presenti nei picchi più rilevanti riscontrabili nello spettro soprastante; in modo da conferire una lettura più immediata dei componenti più rilevanti (non a livello quantitativo).

Nella seconda fase sperimentale di laboratorio sono stati confrontati i difrattogrammi relativi al fango tal quale (Fig. 4.7), con i campioni relativi alla prima fase di laboratorio quelli denominati 75F+25C (Tab. 26), e 25F+75C (Tab. 24.1).



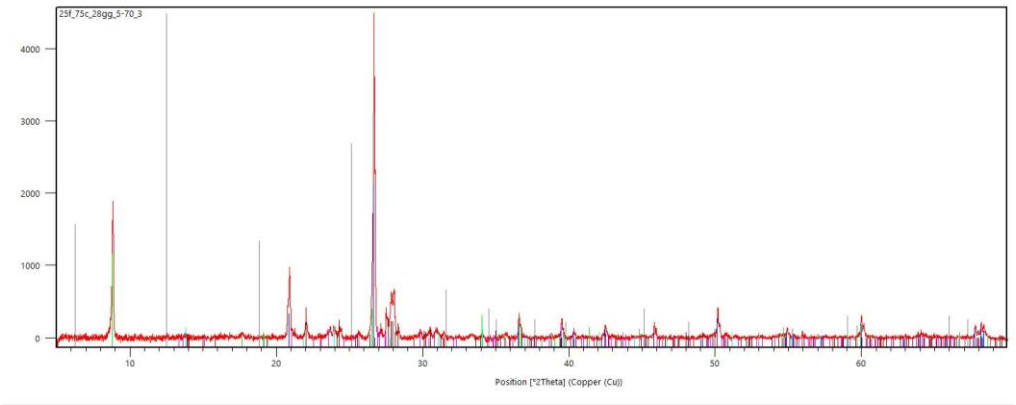


Figura 4.8, In sequenza diffrattogramma 75%Fango+25%Cocciopesto e 25%Fango+75%Cocciopesto, i cui minerali risultano gli stessi della Fig. 4.7.

I due spettri relativi alle miscele selezionate nella seconda fase di laboratorio per poter proseguire lo studio di suddetta tesi, sono stati riportati per completezza senza l'utilizzo dello schema concettuale poiché i componenti del composto in seguito alla sua attivazione non sono variati in modo significativo.

Per quanto concerne l'analisi effettuata al Fango tal quale rispetto la sua composizione granulometrica possiamo constatare il diametro dei grani al 90% passante per un ipotetico setaccio manuale al 10%=3,55 µm, al 50%=24,09 µm, e al 90%=86,36 µm.

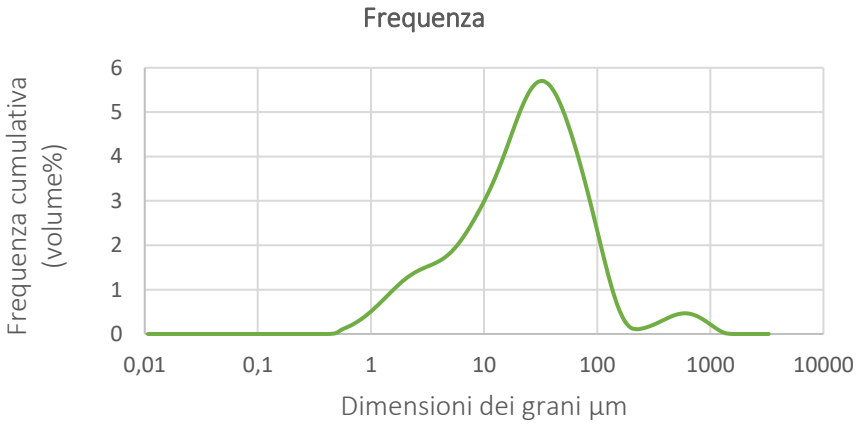


Fig 4.9, Distribuzione granulometrica del fango tal quale, La curva granulometrica è rappresentata nelle ascisse dalla dimensione dei grani in micrometri, e nelle ordinate dalla frequenza cumulativa espressa in volume percentuale.

4.5 STRUMENTAZIONE DI LABORATORIO

Allego per una più utile interpretazione e comprensione della fase svolta in laboratorio, l'elenco di tutte le strumentazioni utilizzate:

- Vibrovaglio utilizzato per la setacciatura;
- Agitatore magnetico con piastra riscaldante;
- Stufe;
- Bilancia elettronica e analitica;
- Bechers, palette, pipette, utili alla lavorazione della miscela;
- Mortaio e setacci;
- Stampi in plexiglas.

Fig 4.10, Report fotografico autoprodotto, n°1 stampo utilizzato nella prima fase di laboratorio, n°2/3 macinatura del Fango e dell'Argilla, n°4 miscela completata prima della colatura in stampo, n°5 setacciatura meccanica, n°6 esempio di deposito nel contenitore per stagionatura controllata.

4.6 PREPARAZIONE DELLE MATERIE PRIME

Nella preparazione della miscela alcuni materiali hanno necessitato di una preparazione preventiva, mentre altri come l'ingessil, il fango di segagione (dopo essere stato frantumato con il mortaio) e il cocciopesto sono stati adoperati direttamente.

La soluzione **NaOH** necessaria all'attivazione è stata ricavata dalla miscelazione di acqua distillata con granuli di idrossido di sodio. All'interno di due bechers differenti sono stati pesati i grammi relativi al composto, in seguito si è posizionato il becher contente l'acqua distillata sull'agitatore magnetico ed è stata aggiunta in modo graduale la soda caustica, facendo attenzione alla forte reazione esotermica che quest'ultima produce quando si discioglie. Conseguentemente all'aggiunta del silicato di sodio dopo tre ore di agitazione si è ottenuta la soluzione attivante desiderata che anche in giorni successivi potrà essere miscelata al resto dei componenti utili alla realizzazione dell'impasto geopolimerico. La percentuale in peso utilizzata dei due componenti è del 50%, così come descritto nella fase di mix-design, i bechers e pipette utilizzati sono stati quelli rigorosamente in teflon, considerato il livello di aggressività della soluzione nei confronti del vetro. Anche l'inserimento lento e graduale dei granuli di soda caustica è dovuto al forte calore generato dalla sostanza, la soluzione ottenuta, viene adoperata nel momento del bisogno e deve essere riposta e nominata all'interno di contenitori ben conservati.

I **fanghi di segagione** sono stati frantumati attraverso un mortaio e collocati in un barattolo di vetro, con apposita etichettatura sempre pronti all'utilizzo.

La **loppa d'altoforno,** utilizzata per la realizzazione di provini da mettere a confronto con quelli costituiti da soli fanghi, è stata utilizzata direttamente senza subire alcuna lavorazione.

L'**argilla** utilizzata anch'essa come metro di paragone rispetto le caratteristiche dei provini costituiti solamente da fango, è stata in un primo momento cotta in stufa a una temperatura di 650°C per tre ore consecutive e successivamente all'analisi XRD, abbiamo innalzato la temperatura di 100°C per poterne riscontrare le differenze, in modo da produrre caolino amorfo (metacaolino).

Il **cocciopesto** non ha necessitato di alcuna lavorazione aggiuntiva atta all'utilizzo.

H_2O_2 e la polvere di **Alluminio,** sono state utilizzate direttamente nella miscela senza alcuna preparazione per realizzare i provini porosi.

4.7 PREPARAZIONE DELLA MISCELA

Gli stampi utilizzati hanno una capacità volumetrica di 32 cm^3(2x2x8 cm^3), essendo così piccoli come dimensioni e avendo realizzato la miscela sempre per pochi provini alla volta, in base anche alle disponibilità in laboratorio, non è stato necessario in questa fase l'utilizzo di un miscelatore meccanico, bensì la soluzione attivante è stata miscelata manualmente alle polveri caratteristiche della tesi in questione. Una volta miscelati i due componenti e preparato lo stampo in plexiglas, adeguatamente pulito e lubrificato con un disarmante per facilitarne successivamente la rimozione, si è collocato lo stampo all'interno di un contenitore in plastica chiuso, affiancato da un teflon ricolmo d'acqua in modo tale che l'ambiente rimanesse correttamente saturo. I provini sono stati in stufa tendenzialmente per 48h, a una temperatura di 80°C. Come si potrà notare nelle successive tabelle utili a descrivere un report di miscele effettuate in laboratorio, durante la preparazione di questi provini sono state sperimentate due soluzioni di cui una densa e una porosa, avendo avuto un risultato poco soddisfacente per i provini porosi, abbiamo terminato lo studio attraverso la sola miscela densa. In seguito, elencherò quello che è stato un diario utilizzato in laboratorio per organizzare e gestire i provini e i loro risultati. La preparazione della miscela si può dunque riassumere in questi passaggi:

- Realizzazione della soluzione attivante;
- Preparazione degli stampi, pulitura e corretto cospargimento di disarmante;
- Pesatura e mescolamento degli altri componenti;
- Miscelazione di tutto il composto;
- Colaggio negli appositi stampi;
- Compattazione della miscela;
- Posizionamento degli stampi all'interno del contenitore con teflon d'acqua per controllare la saturazione;
- Cottura in stufa;
- Codice identificativo provini, data e tipologia;
- Messa a stagionatura dei provini in ambiente controllato (contenitore + teflon di H_2O).

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6403 g
NaOH	2,63 g	2,6600 g
Ingessil	22,74 g	22,75 g
Fango di segagione	52 g	52 g

Tabella 15, 1°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6333 g
NaOH	2,63 g	2,6337 g
Ingessil	22,74 g	22,74 g
Fango di segagione	52 g	52,0076 g

Tabella 16, 2°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6333 g
NaOH	2,63 g	2,6337 g
Ingessil	22,74 g	22,74 g
Fango di segagione	52 g	52,0076 g
Alluminio	1% del Fango	0,5415 g

Tabella 16.1, 2°prova di provini porosi

Come si può osservare in fig. 4.13 il primo risultato riscontrato nella realizzazione dei provini porosi non è stato per niente soddisfacente, l'alluminio utilizzato non si è amalgamato all'impasto, che una volta uscito dalla stufa si presentava distribuito su tutta la superficie, senza creare alcun tipo di porosità.

Componenti x 3 C	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	7,89 g	7,896 g
NaOH	7,89 g	7,90 g
Ingessil	68,22 g	68,33 g
Fango di segagione	156 g	156 g

Tabella 17, 3°prova di provini densi

Durante la 3°prova abbiamo potuto constare già solo a livello visivo che gli stampi dei successivi provini dovevano essere vibrati ulteriormente e in modo migliore al fine di far fuoriuscire le bolle d'aria presenti nella miscela e ottenere un provino più regolare. Inoltre, dopo tre giorni, è stato preso 1 dei 3 provini realizzati e messo in H_2O per vedere la sua reazione, la quale si è manifestata attraverso uno sgretolamento al tatto del materiale (fig. 4.11).

Figura 4.11, immersione in acqua del provino con conseguente rottura e misurazione del pH, immagine autoprodotta.

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6447 g
NaOH	2,63 g	2,6426 g
Ingessil	22,74 g	22,8241 g
Fango di segagione	52 g	52,09 g
Alluminio	1% del Fango	0,52 g

Tabella 17.1, 3°prova di provini porosi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6316 g
NaOH	2,63 g	2,6391 g
Ingessil	22,74 g	23,18 g
Fango di segagione	52 g	52,0306 g
H_2O_2	0,8% di 80	0,64 g

Tabella 18, 4°prova di provini porosi

In Tab.18, è possibile vedere la prima variazione che è avvenuta nel confezionamento dei provini porosi, dati più riscontri negativi dovuti dall'utilizzo dell'alluminio abbiamo seguito la letteratura di riferimento (paragrafo

4.1) e iniziato a testare l'utilizzo dell'acqua ossigenata, variando anche le modalità di cottura. I seguenti provini porosi verranno cotti in una prima mezz'ora a 50°C per poi terminare il ciclo in stufa di 48h a 80°C.

Componenti x 3 C	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	7,89 g	7,9052 g
NaOH	7,89 g	7,8902 g
Ingessil	68,22 g	68,25 g
Fango di segagione	156 g	156,02 g

Tabella 19, 5°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6401 g
NaOH	2,63 g	2,6328 g
Ingessil	22,74 g	22,7726 g
Fango di segagione	52 g	52,03 g
H_2O_2	1% di 80	0,845 g

Tabella 19.1, 5°prova di provini porosi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6259 g
NaOH	2,63 g	2,6340 g
Ingessil	22,74 g	22,85 g
Fango di segagione	26 g	26,06 g
Loppa d'altoforno	26 g	26,17 g

Tabella 20, 6°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,6359 g
NaOH	2,63 g	2,7334 g
Ingessil	22,74 g	25 g
Fango di segagione	26 g	26,452 g
Loppa d'altoforno	26 g	26 g
H_2O_2	1% di 80	0,82 g

Tabella 20.1, 6°prova di provini porosi

La 6° prova rappresenta un mezzo di confronto con le attività studiate in letteratura, così come abbiamo citato nel paragrafo 4.1. Il quantitativo in grammi di fango di segagione da inserire nella miscela è stato diviso al 50% con la loppa d'altoforno in modo da constatare già solo al tatto quanto aumentassero le proprietà meccaniche del provino finale. Anche con la loppa d'altoforno i risultati dei porosi non sono stati soddisfacenti, e dopo averli immersi in acqua si sono frantumati come nella prova precedente (Fig. 4.11).

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg	Densità di Archimede kg/m^3
H_2O	2,63 g	2,6563 g	4,8	21,5	2343
NaOH	2,63 g	2,6330 g			
Ingessil	22,74 g	22,83 g			
50% Fango di segagione	26 g	26,95 g			
50% Cocciopesto	26 g	26,61 g			

Tabella 21, 7°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg	Densità di Archimede kg/m^3
H_2O	2,63 g	2,6364 g	5,3	22,1	2226
NaOH	2,63 g	2,6277 g			
Ingessil	22,74 g	22,83 g			
25% Fango di segagione	13 g	13,50 g			
75% Cocciopesto	39 g	39,01 g			

Tabella 21.1, 7°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg	Densità di Archimede kg/m^3
H_2O	2,63 g	2,6250 g	4,8	16,6	2088
NaOH	2,63 g	2,6280 g			
Ingessil	22,74 g	24,92 g			
100% Cocciopesto	52 g	52 g			

Tabella 21.2, 7°prova di provini densi

In questo caso la 7°prova, ha visto protagonista il cocciopesto, abbiamo voluto provare ad utilizzare questo materiale per differire dalla Loppa pur mentendo l'idea di utilizzare il nostro fango di segagione. Il cocciopesto è stato testato in quantità pari al 50% in fango, poi in quantità maggiori rispetto al fango sino ad arrivare al confezionamento di un provino in solo cocciopesto. I risultati sono stati subito interessanti così da decidere di continuare con questi due componenti e di realizzare le prime prove meccaniche (paragrafo 4.9).

Componenti x 3 C	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 29 gg	P. Compressione σ_M (MPa) 29 gg	Densità di Archimede kg/m^3
H_2O	7,89 g	7,892g	Valore medio 4,90 Deviazione standard 0,4	Valore medio 19,6 Deviazione standard 1,2	2301
NaOH	7,89g	7,91g			
Ingessil	68,22 g	68 g			
50% Fango di segagione	78 g	78 g			
50% Cocciopesto	78 g	78 g			

Tabella 22, 8°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (Mpa) 29 gg	Pr. Compressione σ_M (Mpa) 29 gg	Densità di Archimede kg/m^3
H_2O	2,63 g	2,647 g	1,6	4,0	1493 1421
NaOH	2,63 g	2,721 g			
Ingessil	22,74 g	22,91 g			
50% Fango di segagione	26 g	26,56 g			
50% Cocciopesto	26 g	26,24 g			
H_2O_2	1% di 80	0,80 g			

Tabella 22.1, 8°prova di provini porosi

L'8° prova mostra come la soluzione dei provini 50% fango e 50% cocciopesto abbia valori di resistenza a compressione intorno ai 20 MPa, un risultato molo buono che volevo continuare a migliorare, andando a sperimentare sul peso % di queste due componenti.

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	2,658 g
NaOH	2,63 g	2,642 g
Ingessil	22,74 g	24,797 g
100% Argilla	52 g	52,326 g

Tabella 23, 9°prova di provini densi

Così come abbiamo fatto per la loppa, si è provato ad aumentare le prestazioni dei provini con l'utilizzo dell'argilla anche se quest'ultima richiede un processo energivoro per la sua cottura, effettuata in questo caso a 750°C , e in netta incoerenza con lo sviluppo di suddetta tesi.

Figura 4.12, da sinistra a destra, estrazione dell'argilla cotta dalla stufa, miscela ottenuta dalla composizione visibile in Tab. 23, ed estrazione dei provini dallo stampo in seguito alla cottura in stufa.

Componenti x 3 C	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg
H_2O	7,89 g	7,875g	Valore medio 3,5 Deviazione standard 0,4	Valore medio 14,8 Deviazione standard 1,0
NaOH	7,89g	8,020g		
Ingessil	68,22 g	~68 g		
50% Fango di segagione	78 g	78,06 g		
50% Cocciopesto	78 g	78,08 g		

Tabella 24, 10°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg
H_2O	2,63 g	2,658 g	4,2	20,4
NaOH	2,63 g	2,642 g		
Ingessil	22,74 g	22,797 g		
25% Fango di segagione	13 g	13,147 g		
75% Cocciopesto	39 g	39,04 g		

Tabella 24.1, 10°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 29 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 29 gg
H_2O	2,63 g	2,66 g	3,1	16,2
NaOH	2,63 g	2,631 g		
Ingessil	22,74 g	22,94 g		
75% Fango di segagione	39 g	39,25 g		
25% Cocciopesto	13 g	13,1864 g		

Tabella 25, 11°prova di provini densi

Componenti x 3 C	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg
H_2O	7,89 g	7,893g	Valore medio 3,5 Deviazione standard 0,4	Valore medio 31,8 Deviazione standard 2,3
NaOH	7,89g	7,966g		
Ingessil	68,22 g	68,51 g		
75% Fango di segagione	117 g	~117 g		
25% Cocciopesto	39 g	39,32 g		

Tabella 26, 12°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite
H_2O	2,63 g	9,63 g
NaOH	2,63 g	2,656 g
Ingessil	22,74 g	27,43 g
100% Argilla	52 g	51,98 g

Tabella 26.1, 12°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg
H_2O	2,63 g	2,83 g	10,4	44,0
NaOH	2,63 g	2,656 g		
Ingessil	22,74 g	27,43 g		
75% Fango di segagione	39 g	39,07 g		
25% Argilla	13 g	13,07 g		

Tabella 26.2, 12°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 28 gg	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg
H_2O	3,13 g	3,15 g	5,1	3,0
NaOH	2,63 g	2,715 g		
Ingessil	22,74 g	22,90 g		
H_2O_2	1% di 80	0,80 g		
75% Fango di segagione	39 g	39,56 g		
25% Cocciopesto	13 g	13,22 g		

Tabella 26.3, 12°prova di provini densi

Componenti	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Flessione σ_M (MPa) 29 gg	Pr. Compressione σ_M (Mpa) 29 gg
H_2O	3,13 g	3,14 g	1,0	0,1
NaOH	2,63 g	2,670 g		
Ingessil	22,74 g	27 g		
75% Fango di segagione	39 g	39,51 g		
25% Cocciopesto	13 g	13,09 g		
H_2O_2	1% di 80	g		

Tabella 27, 13°prova di provini densi

Dalla 10° prova in avanti, eseguendo anche le analisi meccaniche atte a verificare le resistenze a compressione e flessione del materiale, abbiamo constatato come le proprietà migliori si verificassero in presenza di fango miscelato a cocciopesto, in particolare utilizzando un rapporto pari al 75% di fango e 25% di cocciopesto. A

questo punto lo step successivo al quale ci siamo dedicati è stato la progettazione del materiale interrogandoci su come usarlo, ancorarlo e confezionarlo nei parametri stabiliti dalle norme.

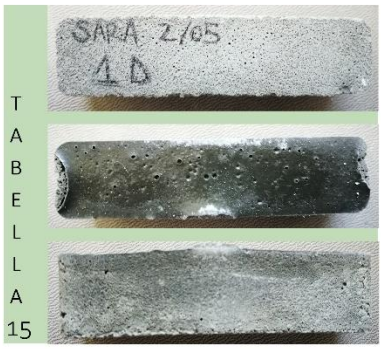


TABELLA 15

TABELLA 16

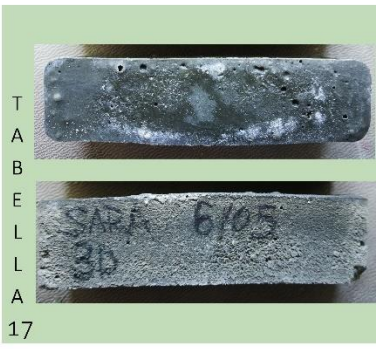


TABELLA 17

TABELLA 17.1

TABELLA 18

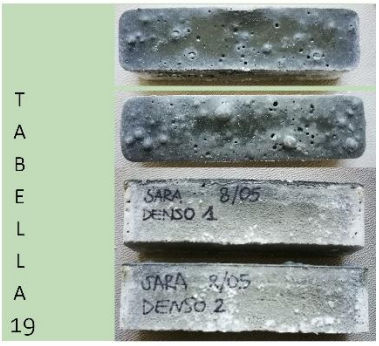


TABELLA 19

TABELLA 19.1

TABELLA 20

TABELLA 20.1

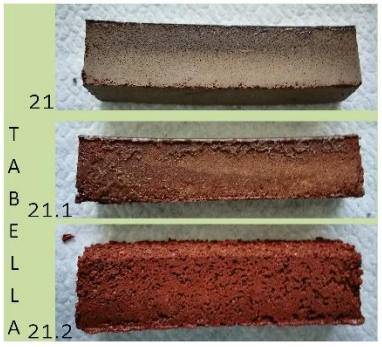

21
TABELLA 21.1
TABELLA 21.2

TABELLA 22

TABELLA 22.1

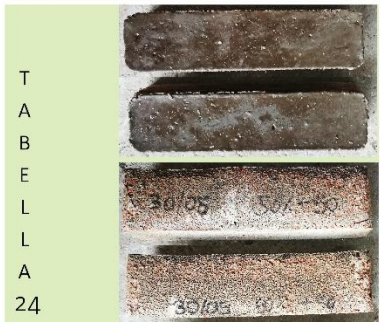


TABELLA 24

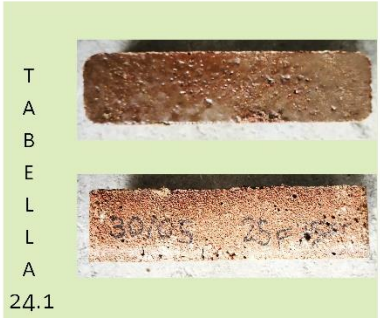


TABELLA 24.1

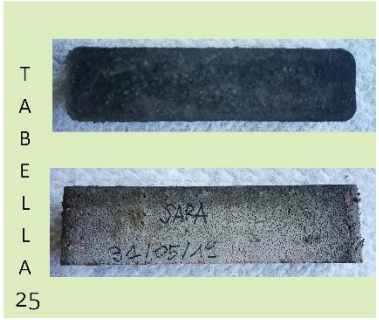


TABELLA 25

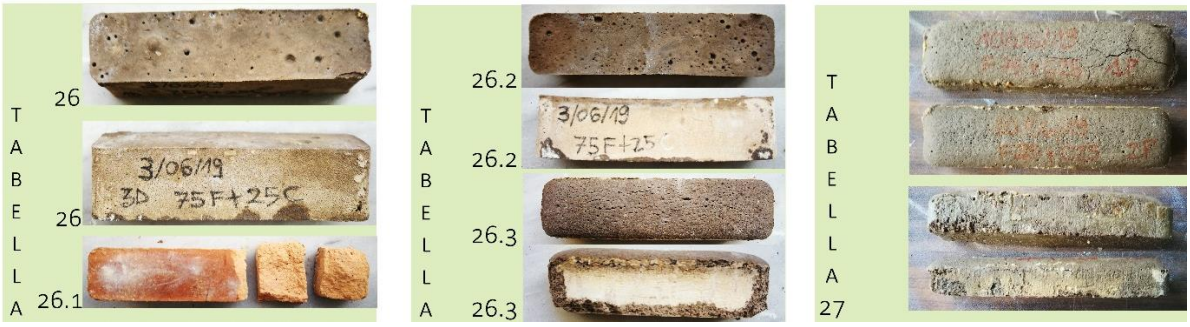


Figura 4.13, Documentazione fotografica relativa alle tabelle sopracitate, immagine autoprodotta.

4.8 PREPARAZIONE DEGLI STAMPI

Gli stampi utilizzati possono contenere cinque campioni alla volta, si presentano in plexiglas e ogni qualvolta che sono stati utilizzati nelle prove precedentemente descritte, hanno subito un'attenta pulitura e trattamento con un disarmante in modo tale da facilitarne l'espulsione una volta uscito dalla stufa. In primo luogo, abbiamo utilizzato una resina, ma non avendo avuto riscontri così positivi abbiamo optato per un altro tipo di disarmante liquido. In fig. 4.14 si può notare la presenza di morsetti metallici, i quali avevano il compito di tenere fermo e compatto lo stampo, poiché per eseguire le prove meccaniche ed avere dei risultati veritieri la volumetria finale del provino doveva essere regolare e ben definita.

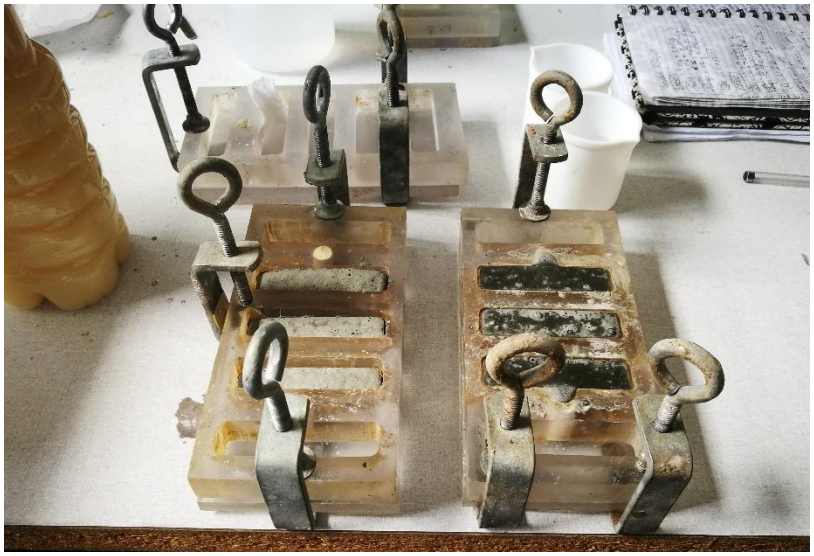


Figura 4.14, Estrazione dei provini dalla stufa per successiva sformatura dei campioni, immagine autoprodotta.

4.9 PROVE E RISULTATI OTTENUTI

Dai campioni prodotti di fango e cocciopesto abbiamo dedotto che fosse possibile realizzare delle prove più consone alla caratterizzazione del materiale, abbiamo eseguito dei **test meccanici** all'interno del laboratorio "Centro Rischi e Durabilità delle Costruzioni" ubicato nel Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, presso il Politenico di Torino. Abbiamo valutato la resistenza a flessione e compressione del materiale per poter determinare che l'uso proposto fosse adeguato alle sue caratteristiche. A questo punto dello studio condotto, l'obiettivo da raggiungere era quello di creare un materiale utile alle realizzazioni di elementi di chiusura verticale, che fosse accompagnato da un isolante anch'esso possibilmente derivante da un processo di riciclo o reimpiego di altri materiali. Il macchinario di test utilizzato, prodotto dalla ZWICK ROELL è connesso all'utilizzo di un computer sul quale è installato il software "Test Expert II", il quale permette di gestire facilmente i risultati connessi alle prove effettuate, mediante il salvataggio e l'esportazione dei dati in un foglio di calcolo Excel. Il macchinario si compone di una traversa mobile superiore che può essere gestita a

seconda delle prove con una pulsantiera, e da una cella di carico di 50 kN. Le due tipologie di analisi vanno effettuate in sequenza prima attraverso lo studio della resistenza a flessione, il quale lascia le due estremità integre del campione di partenza e successivamente con l'analisi a compressione, la quale invece va appunto a frantumare l'estremità analizzata.

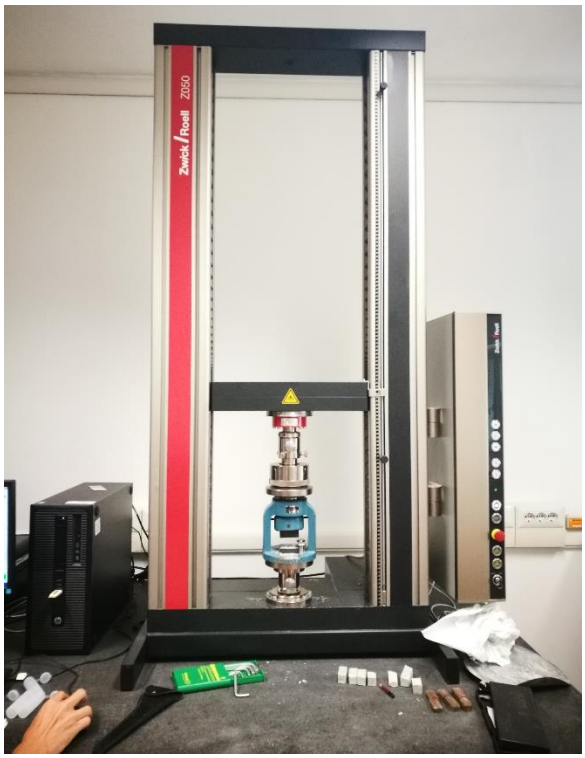


Figura 4.15, Macchina di prova materiali 50 kN Allround table Top, ZWICK ROELL, DISEG, Politecnico di Torino, fotografia autoprodotta.

La **resistenza a flessione**, il campione è stato prima accuratamente misurato, una volta inseriti i dati nel programma è stato messo di traverso, ovvero in modo tale da imprimere la forza massima nella freccia inferiore, in posizione di mezzeria rispetto lo strumento. Il carico viene proposto perpendicolarmente all'oggetto in entrambi i casi.

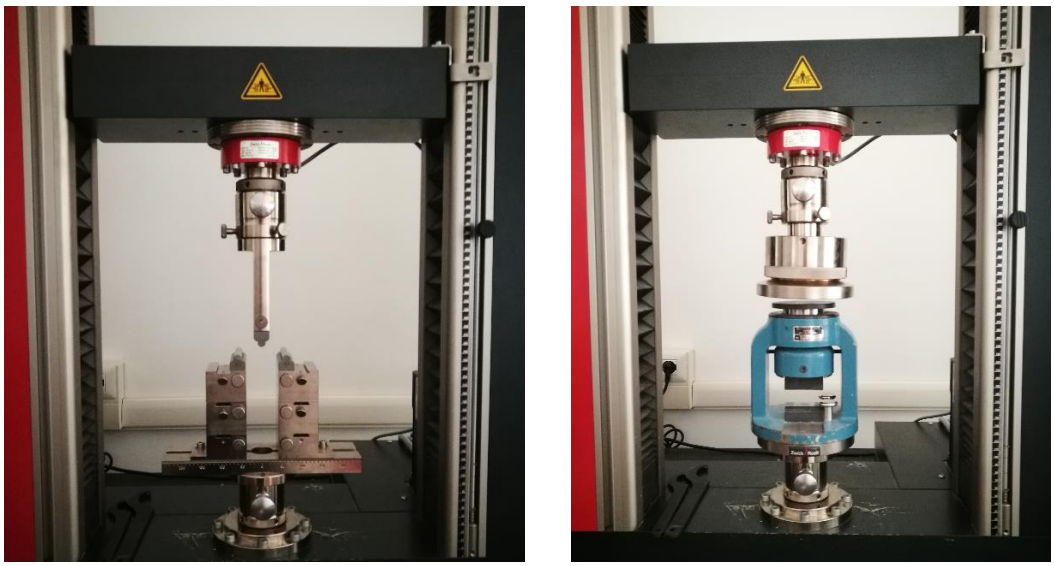


Figura 4.16, A sinistra montaggio per la prova di resistenza a flessione, a destra montaggio per la prova di resistenza a compressione, DISEG, Politecnico di Torino, fotografie autoprodotte.

I due monconi residui dalla prova di flessione, vengono nuovamente misurati, per una più corretta determinazione dei risultati della **prova a compressione**. Una volta eseguiti i test, sono stati recuperati dei frammenti per poter nuovamente realizzare l'analisi XRD e su alcuni campioni è stata determinata la densità attraverso la prova di Archimede. Il file excel esportato in seguito ai test, ha permesso di rielaborare i dati ottenuti, così come si possono osservare nelle tabelle del paragrafo 4.7 in cui quando vi è la presenza di almeno tre campioni sono stati calcolati valore medio e deviazione standard in modo da massimizzare l'esattezza dei valori.

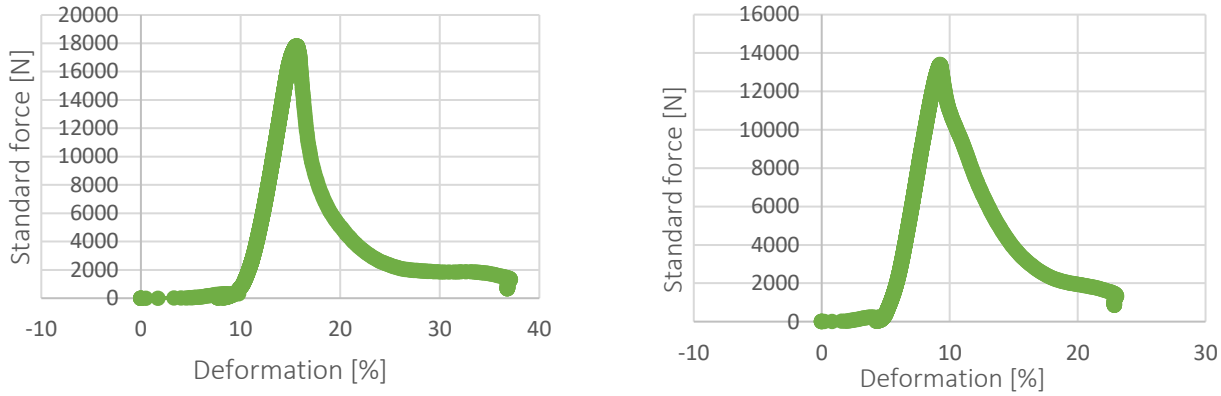


Figura 4.17, a sinistra il grafico relativo alla miscela 75F%+25%A, a destra miscela 75F%+25C%, relativi alle tabelle 26.2 e 26. Grafici esportati dal programma Test Expert II.

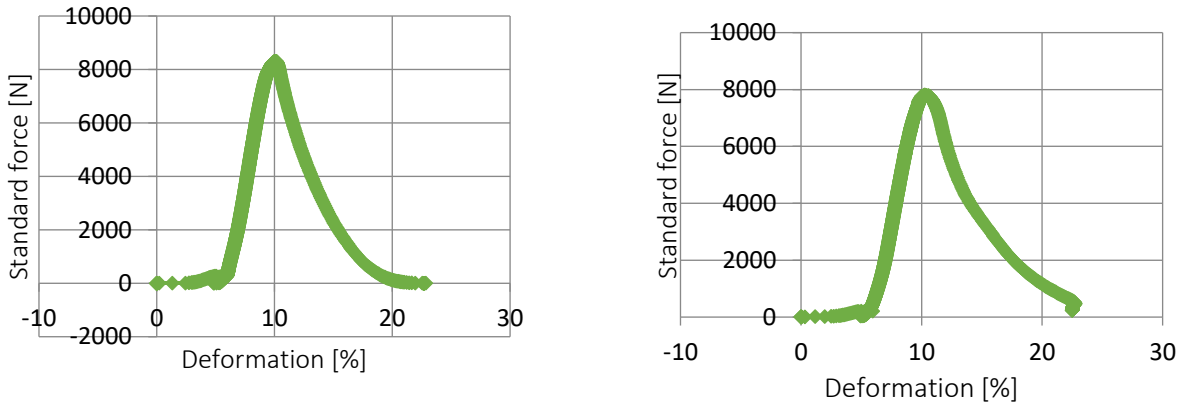


Figura 4.18, a sinistra il grafico relativo alla miscela 25F%+75%C, a destra miscela 50F%+50C%, relativi alle tabelle 21.4 e 21. Grafici esportati dal programma Test Expert II.

Nei quattro grafici selezionati relativi ai diagrammi tensione-deformazione la cosa molto visibile è il differire del punto di rottura e la collocazione del range del campo elastico, tra il grafico relativo alla miscela 75% fango più 25% argilla rispetto gli altri tre costituiti da fango e cocciopesto. Tramite Fig. 4.17-4.18 si possono vedere le miscele che hanno avuto le migliori proprietà meccaniche, le quali dopo un'accurata analisi ci hanno portato a scegliere la miscela costituita da 75%F+25%C, con valori uguali a 31,8 ± 2,3 MPa di resistenza a compressione, e 3,5 ± 0,4 MPa di resistenza a flessione.

Oltre ai test meccanici eseguiti, abbiamo misurato la densità di alcuni provini tramite la **densità di Archimede**, (Tab. 21, 21.1, 21.2, 22, 22.1) nei campioni costituiti da fango e cocciopesto con percentuali variabili dal 50, 75, 100% di cocciopesto rispetto al fango. Inoltre, due dei provini misurati attraverso questa prova presentavano una struttura porosa rispetto gli altri. La prova consiste nel pesare dapprima il frammento del campione in aria, ovvero posizionandolo all'interno della bilancia nel piattino metallico superiore presente nella strumentazione visibile in Fig. 4.19, e conseguentemente immetterlo nel bicchiere in vetro ricolmo

d'acqua distillata. La prova necessita di tempo per essere più attendibile possibile, e conseguentemente alle pesate si ottiene la densità di Archimede tramite la seguente formula:

$$\rho = \frac{w(a) * \rho(fl)}{w(a) - w(fl)}$$

ρ = densità di Archimede, kg/m^3
$w(a)$= peso in aria del campione analizzato
$\rho(fl)$= densità del fluido
$w(fl)$= peso in H_2O del campione analizzato

Figura 4.19, misurazione della densità di Archimede con strumentazione inserita all'interno della bilancia analitica, DISAT, Politecnico di Torino, immagine autoprodotta.

I campioni solidi misurati hanno dei valori di densità compresi tra 2088 e 2343 kg/m^3, mentre quelli porosi hanno valori tra 1421 e 1493 kg/m^3, se li confrontiamo a materiali presenti oggi in commercio come blocchi di cls aventi densità di 1450 kg/m^3, calce con 2200 kg/m^3 oppure materiali isolanti come pannelli in fibra di legno con densità compresa tra 45 e 450 kg/m^3, i quali sono impiegati attualmente nell'utilizzo ultimo che vorremmo proporre del nostro materiale, mostrano dei valori soddisfacenti di densità.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA CAPITOLO 4: ATTIVITA' DI LABORATORIO

- Palmero, P., Formia, A., Tulliani, J.-M., Antonaci, P., *Valorisation of alumino-silicate stone muds: From wastes to source materials for innovative alkali-activated materials, Cement and Concrete Composites,* Volume 83, Turin, October 2017, pp. 251-262
- STEFANO GHIOTTI, *Tesi di Laurea Magistrale: Scarti di lavorazione della pietra ornamentale, analisi di reimpiego in formulazioni geopolimeriche contenenti loppa d'altoforno,* Politecnico di Torino 2017

5. PRODOTTO FINALE

Quest'ultima attività svolta in laboratorio è stata determinata dai risultati positivi ottenuti nella prima fase sperimentale, accompagnata dal Professore Marco Zerbinatti e dall'aiuto pratico di Pierluigi Guarrera, il quale mi ha aiutata nella realizzazione dello stampo. Buoni valori di resistenza meccanica a compressione, risultati soddisfacenti di stagionatura del materiale e la volontà di perseguire in questa tesi di studio, avente la finalità di ottenere un risultato punto di partenza per nuove ricerche e nuovi spunti atti al reimpiego di fanghi di segagione, hanno spinto questo progetto ad andare avanti. Lo step successivo è stato appunto quello di pensare alla destinazione d'uso finale di questo prodotto, in che modo poteva essere reimpiegato un materiale avente tali caratteristiche, in che forma, dimensioni, e confezionamento finale del prodotto edilizio. La prima idea di progetto prevedeva la creazione di un pannello multistrato, da utilizzare per la realizzazione di facciate verticali con l'inserimento di vari stati di isolante termico. L'idea finale, la quale, è stata portata avanti in laboratorio, prevedeva invece la creazione di un blocco ad incastro maschio/femmina per realizzare una tipologia di facciata autoportante non avente funzione strutturale. Per poter svolgere queste azioni di progettazione nel modo più corretto possibile, onde evitare uno studio fine a sé stesso, sono state analizzate varie normative UNI, fra le quali:

- UNI EN 771-1:2011
- UNI EN 772-9:2007
- UNI EN 772-16:2011
- UNI EN 772-3:2000

Tali normative hanno come oggetto i laterizi, è stato deciso per l'appunto di basarsi su di essi utilizzando però la nostra miscela composta di fanghi di segagione. In particolare, essendo le norme troppo specifiche ed inerenti ad un prodotto già realizzato da testare con determinate verifiche, ho individuato quello che è un prodotto presente attualmente in commercio, utilizzato normalmente nella realizzazione di pareti autoportanti non strutturali, e l'ho rielaborato a seconda delle esigenze del materiale oggetto di tesi. Come si può osservare nella scheda tecnica allegata nel capitolo 7, ho scelto di utilizzare un poroton P700, prodotto in Italia dall'azienda Danesi le cui misure dalla lunghezza, larghezza e altezza risultano essere 30x25x24,5 cm^3 per una percentuale di foratura del 55%.

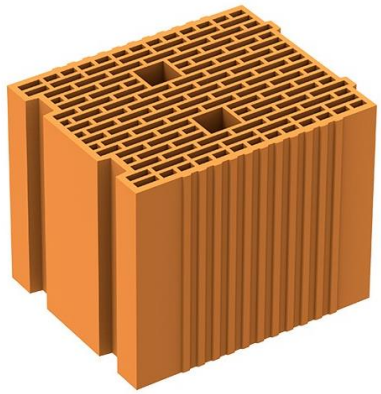
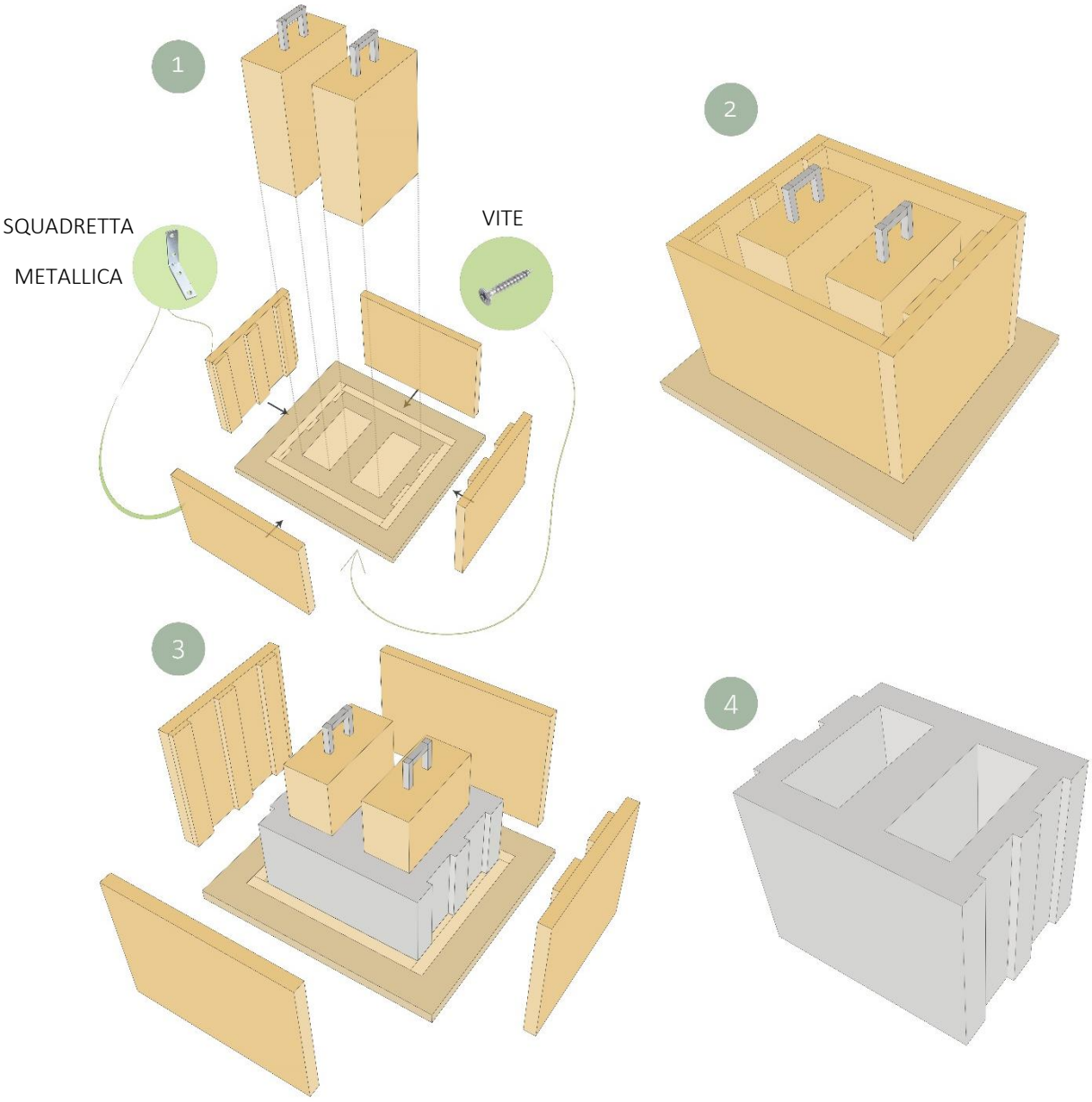


Figura 5.1, Poroton P700 Danesi.

5.1 PROGETTAZIONE DELLO STAMPO E REALIZZAZIONE

Sebbene le misure siano le stesse di un P700, utilizzando una tecnica di formatura differente dalla classica estrusione realizzata per dei blocchi di laterizio, si è dovuto progettare una forma che permettesse di avere le medesime percentuali di foratura senza però presentare tanti vuoti sulla superficie. Per rendere la creazione dello stampo più semplice ed efficace possibile, abbiamo realizzato solamente due vuoti centrali che avessero il dimensionamento necessario ai valori da raggiungere, abbiamo pensato a una base sulla quale si innestavano

le pareti verticali necessarie a determinare il negativo del nostro blocco. I materiali utilizzati per creare questo stampo sono per la maggior parte materiali di recupero forniti in laboratorio DISEG (Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica) come ad esempio l'OSB, il legno e l'alluminio utilizzati nella prima prova utile a generare lo stampo in scala 1:1 del prodotto edilizio. Lo stampo si compone quindi da una base sulla quale sono ancorate perpendicolarmente quattro pareti verticali, due rappresentanti la lunghezza e le altre due aventi il negativo atto a formare l'incastro maschio/femmina una volta affiancate. I due parallelepipedi centrali utili nella definizione in negativo dei due vuoti del blocco sono stati pensati anch' essi ancorati alla base e forniti di maniglia per la futura rimozione di questi durante lo scassero finale (vedi 4 step sottostanti in Fig. 5.2). Onde evitare la presa della miscela d'impasto allo stampo, oltre all'utilizzo di un classico disarmante, abbiamo, in un primo momento, rivestivo lo stampo con un foglio di alluminio che conseguentemente è stato sostituito con un adesivo in acciaio, data l'incompatibilità chimica del fango alcali-attivato con l'alluminio.



Descrizione metodologica progettuale dell'utilizzo dello stampo, 1°step esploso assonometrico utile a comprendere tutti gli elementi di cui si compone lo stampo, 2°step unione e confezionamento del calco per la successiva colatura della miscela e immissione nella camera climatica, 3°step scomposizione e disunione degli elementi dello stampo in modo da estrarre il blocco una volta uscito dalla camera climatica, 4° step blocco finale ultimato estratto dallo stampo.

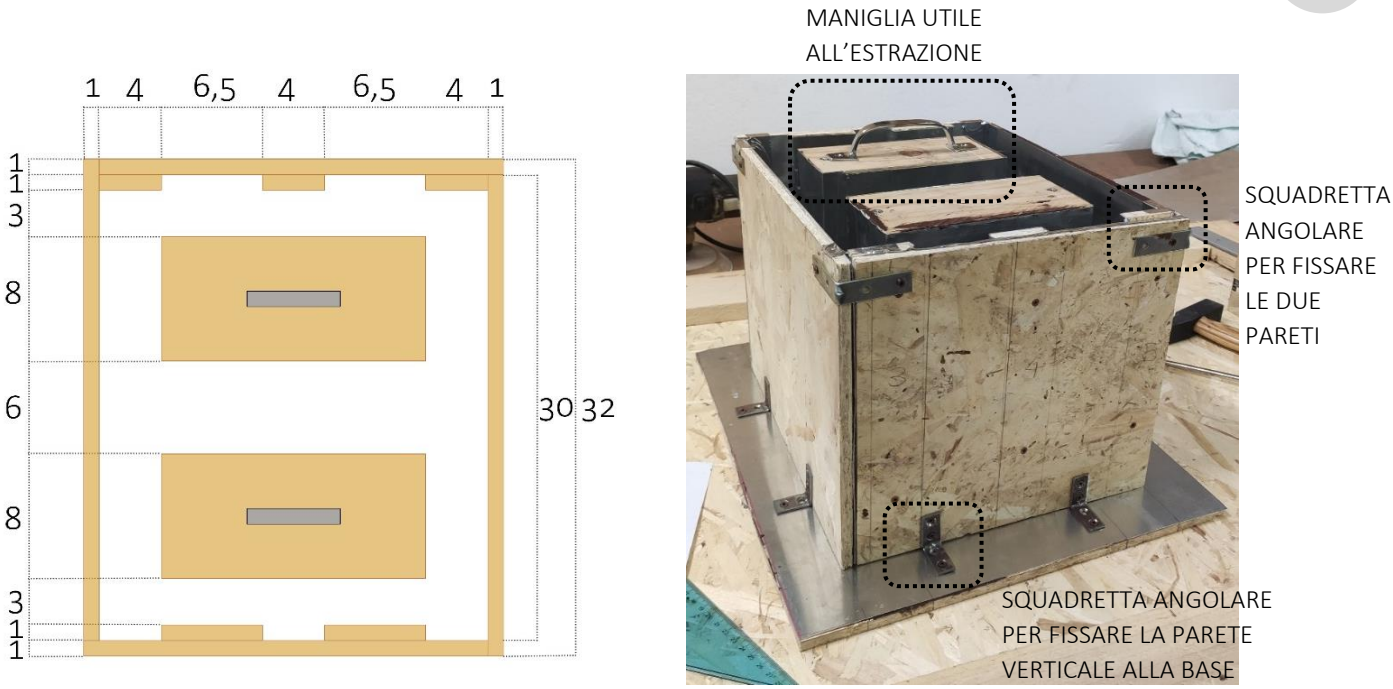
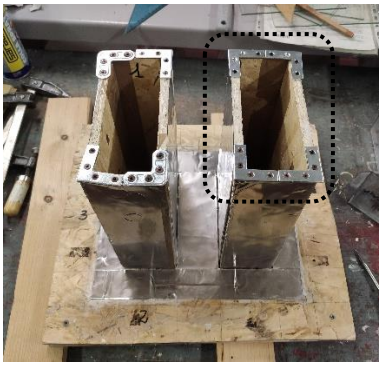


Figura 5.2, Descrizione del blocco 1, dimensionamento su disegno in pianta quotato in centimetri e realizzazione, immagini e foto autoprodotte.

In seguito ai risultati ottenuti durante la prima prova, come si può notare nel paragrafo 5.4, abbiamo eliminato l'alluminio dalle pareti interne dello stampo e l'abbiamo sostituito con un nastro adesivo in acciaio inossidabile, poiché la reazione chimica generata dalla miscela sull'alluminio non aveva un riscontro positivo bensì un attacco chimico non indifferente. Le pareti fatte in OSB presentano una superficie ruvida e scanalata dalle fibre lignee che compongono il pannello, rivestire quest'ultime con una stratigrafia in acciaio permette di non far aderire il composto, e quindi di facilitarne l'estrazione migliorando anche il risultato estetico finale. Oltre al rivestimento esterno una seconda modifica dello stampo finale è stata fatta per sostituire i due blocchi di legno centrali utili a creare il vuoto del blocco finale, essendo avvitati nella parte inferiore della base del blocco garantivano la stabilità una volta colato al suo interno la miscela, ma avendo riscontrato anche questa volta problemi nella fase di estrazione del blocco appena uscito dalla camera climatica, si è dovuto ripensare a una metodologia che fosse meno invasiva, le cui forze non andassero a fessurare la superficie più soggette del provino con conseguente rottura. I due vuoti centrali sono stati pensati sempre costituiti da pareti verticali in OSB, anzi che i due parallelepipedi in pieno legno della versione precedente, e per realizzarli abbiamo inspessito la base e forato l'area interessata dai vuoti in modo da avere più superficie su cui appoggiare e ancorare le pareti centrali ortogonali, costitutrici dei due rettangoli. A livello superiore abbiamo collegato le pareti con dei profili a "L" piatti in modo da tenere uniti gli angoli dei due rettangoli, e a livello inferiore abbiamo inserito un profilo ad "L" angolare per far sì che la pressione esercitata dall'incastro di queste paretine verticali non facesse svirgolare i lati maggiori andando a perdere la forma finale. Dunque, i due rettangoli centrali risultano grazie al foro realizzato nella base, incastrati mentre le pareti sono state avvitate alla base e fra loro, così come nella prima versione dello stampo.

BASE FORATA PER
MIGLIORE ANCORAGGIO



SQUADRETTA ANGOLARE
PIATTA PER ANCORAGGIO
PARETI VERTICALI

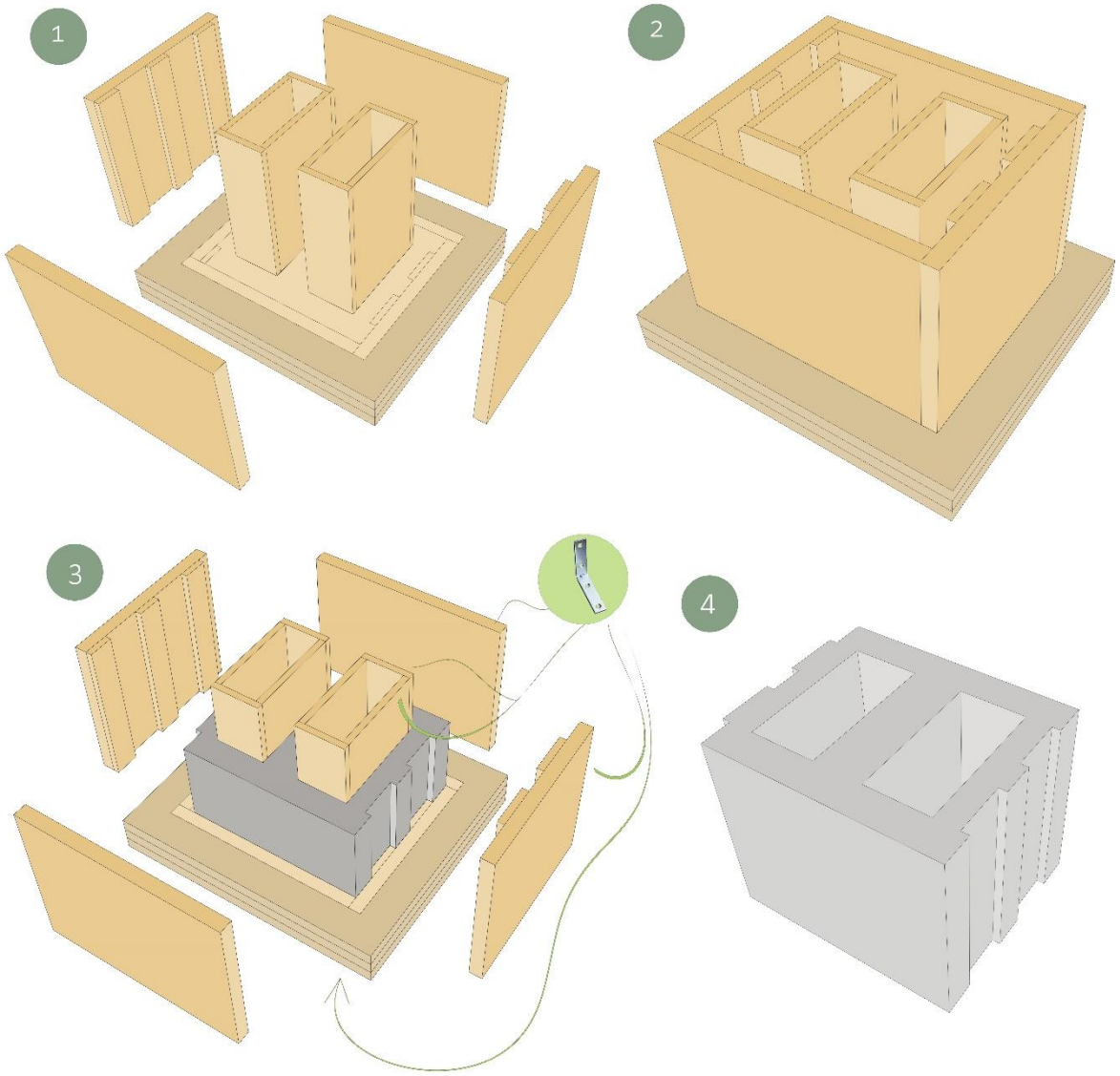


Figura 5.3, nelle tre immagini è possibile vedere il cambiamento a livello progettuale dello stampo dalla prima versione, mentre nei quattro step visibili nei diagrammi schematici sottostanti, si possono vedere nuovamente l'esploso assonometrico, lo stampo assemblato pronto alla colatura della miscela, lo scassero utile all'estrazione del prodotto edilizio con il successivo risultato finale. Anche in questo diagramma si evidenzia l'uso diverso della squadretta metallica, uno stampo riprogettato e ripensato al fine di facilitare l'estrazione del materiale che nel caso di una produzione artigianale e una tecnica come quella utilizzata in suddetta tesi, risulta maggiormente difficile che una tecnica di estrusione classica. Foto e immagini autoprodotte.

5.2 ADATTAMENTO DELLA MISCELA

Prima di procedere al confezionamento dell'intero stampo realizzato in scala 1:1, si è optato di procedere in modo graduale, pertanto le miscele da cui siamo partiti in questa seconda fase di laboratorio sono state calcolate rispetto ad 1/8 della capienza dello stampo finale. La preparazione della miscela è stata un'evoluzione delle quantità del provino in Tab. 26, capitolo 4, ovvero la migliore miscela ottenuta nella prima fase di laboratorio al DISAT, è stata quella costituita da 75% di fango e 25% di cocciopesto. Per passare dalla scala relativa a un provino da 32 cm^3 allo stampo finale è stato preso il quantitativo di un campione costituito da 80 g di prodotto di cui un 35% soluzione e 65% di polveri (F+C) e conseguentemente è stato proporzionato per raggiungere 1/8 della miscela utile a riempire lo stampo per la prima prova.

Componenti 1/8 sul totale	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg
H_2O	131,5g	131,5g	Valore medio 4,8 Deviazione standard 0,42
NaOH	131,5g	131,5g	
Ingessil	1137g	1137,9g	
75% Fango di segagione	1950g	1950g	
25% Cocciopesto	650g	650g	

Tabella 28, 1°prova 1/8 del campione in stampo scala 1:1

Componenti 1/8 sul totale	Quantità esatte	Quantità inserite	Pr. Compressione σ_M (MPa) 28 gg
H_2O	131,5g	131,5g	2
NaOH	131,5g	130,47g	
Ingessil	1137g	1137,2g	
75% Fango di segagione	1950g	1950g	
25% Cocciopesto	650g	650g	

Tabella 29, 2°prova 1/8 del campione in stampo scala 1:1

Figura 5.4, Passaggio di scala della miscela, nella prima fase, immagine di sinistra, miscelata manualmente nella seconda fase miscelatore capienza 4L, immagine sulla destra.

5.3 STRUMENTAZIONE DI LABORATORIO

In questa seconda fase di laboratorio svolta presso il DISEG ho utilizzato oltre alla strumentazione precedente citata, utile a confezionare la miscela (visibile nel capitolo 4) e alla nuova strumentazione adoperata per la realizzazione dello stampo, come trapano, seghetto elettrico, macchinario per taglio laser, frese, e tutti gli utensili utili alla lavorazione dei materiali adottati nella sua realizzazione; è stato necessario l'uso di nuove strumentazioni quali:

- camera climatica ACS CHALLENGE 250, Angelantoni (DISEG);
- miscelatrice da laboratorio MATEST E092 (DISEG);
- macchina per test meccanici della ZWICK ROELL ZMART.PRO (DISEG);
- microscopio elettronico a scansione con sorgente a emissione di campo, FE-SEM Hitachi (DISAT);
- Sputter coater, SPI-MODULE (DISAT).

La **camera climatica** è una camera termostatica e climatica della Angelantoni, la quale permette di controllare due parametri contemporaneamente, temperatura e umidità relativa. Rispetto il trattamento dell'aria vi è un condotto costituito da:

- un evaporatore di raffreddamento;
- un sistema di riscaldamento;
- una ventola di circolazione dell'aria termoregolata;
- sonde utili alla temperatura e all'umidità.

L'aria conseguentemente immessa nella camera di prova passa attraverso questi elementi citati per poi iniziare il suo ciclo di lavoro. Si può effettuare sia un raffreddamento, che in questa tesi specifica non è avvenuto, che un riscaldamento, quest' ultimo, realizzato mediante apposite resistenze elettriche. In suddetto caso studio oltre al controllo della temperatura possibile grazie alla sonda termica e altresì importante quello dell'umidità dovuto invece a una sonda capacitiva. L'utilizzo di questa camera climatica è facilitato dalla presenza di uno schermo touchscreen molto intuitivo e facile da utilizzare.

Figura 5.6, a sinistra camera climatica ACS CHALLENGE 250, Angelantoni. A destra, miscelatrice da laboratorio E092 MATEST, strumentazione utilizzata presso laboratorio DISEG, Politecnico di Torino, fotografie autoprodotte.

Il **miscelatore** di malta computerizzato automatico programmabile ad alte prestazioni, si compone di un'impastatrice planetaria, la quale grazie alla sua duplice rotazione su sé stessa e in senso circolare rispetto il contenitore, permette di ottenere un impasto correttamente miscelato in tutti i suoi ingredienti. Oltre alla bacinella in acciaio INOX avente capacità di 4l, la miscelatrice automatica dispone di una paletta, sempre in acciaio inossidabile, fondamentale per miscelare l'impasto, la cui velocità di rotazione può essere regolata in modo digitale impostando i valori prima del suo utilizzo.

Per i **test meccanici** utili a verificare la resistenza a compressione e flessione del materiale abbiamo cambiato laboratorio, nelle prove precedentemente citate nel capitolo 4 è stato utilizzato un macchinario in grado di produrre una forza massima di 50 kN, essendo questa prova effettuata su un campione di dimensioni maggiori abbiamo dovuto utilizzare un macchinario con una capacità di carico maggiore. La macchina utilizzata per effettuare tali test sui due provini realizzati nello stampo in scala 1:1 è collocata al MASTRLAB, laboratorio sperimentale materiali e strutture facente parte sempre del DISEG, presso il Politecnico di Torino.

Figura 5.7, Macchina di prova materiali 500 kN, ZWICK ROELL, DISEG, Politecnico di Torino, fotografia autoprodotta.

Le osservazioni eseguite tramite **microscopio elettronico a scansione con sorgente a emissione di campo FE-SEM** (Field Emission - Scanning Electron Microscope), è stata realizzata all'interno del laboratorio DISAT, presso il Politecnico di Torino. Tale strumento si avvale di un fascio di elettroni che investe un campione soggetto alla prova (Fig. 5.9). Analisi, utile alla caratterizzazione di materiali, grazie all'acquisizione diretta di immagini contraddistinte da un elevato ordine di ingrandimento, permettendo la caratterizzazione topografica relativa alle superfici piane. I campioni vengono prima trattati attraverso una metallizzazione con uno **sputter coater** (Fig. 5.8), creando un film conduttivo di oro sul quale il fascio di elettroni agirà in un ambiente ad alto vuoto.

Figura 5.8, Sputter coater, SPI-MODULE, DISAT, Politecnico di Torino, metallizzazione del materiale, fotografia autoprodotta.

Figura 5.9, S-4000 SEM, HITACHI, DISAT, Politecnico di Torino, fotografia autoprodotta.

5.4 PROVE E RISULTATI OTTENUTI

L'obiettivo di questa seconda fase sperimentale svolta in laboratorio è stato quello di provare a confrontare le caratteristiche di resistenza a compressione e flessione del manufatto edilizio finito, una volta effettuato il primo passaggio di scala. Come già accennato, abbiamo provato a realizzare 1/8 delle dimensioni reali del nostro blocco, ma il problema fondamentale si è concentrato nell'azione di scassero, una volta completato il ciclo all'interno della camera climatica. A differenza dei campioni realizzati nel capitolo 4, oltre alle dimensioni, la stagionatura avveniva prima in stufa per 48h consecutive e conseguentemente in un contenitore di plastica chiuso, con la presenza di un becher d'acqua in modo da controllare l'umiditià relativa. Nell'attività di laboratorio svolta al DISEG avevamo a disposizione l'utilizzo della camera climatica per cui abbiamo potuto raffinare la tecnica di stagionatura ed esguirla in modo più controllato prima a una temperatura di 80°C e una umidità relativa del 95%, e successivmente alle 48 h la stagionatura continuava all'interno della camera climatica, quindi in ambiente controllato, abbassando la temperatura a 20°C a valore ambiente per 5 giorni consecutivi. Conseguentemente una volta scasserato, abbiamo continuato la stagionatura dei campioni all'interno di un sacchetto di plastica, sempre con la presenza di acqua per controllare l'umidità. Nella prima prova visibile in Fig. 5.11 lo stampo presentava le pareti in OSB anche all'interno senza alcun rivestimento, l'alluminio era stato rimosso poiché avevamo riscontrato quanto fosse in contrasto con la miscela ma avendo utilizzato del disarmante non ha attecchito alla superficie. Dato il lavoro necessario a smontare e rimontare lo stampo ogni qualvolta realizzata una miscela, abbiamo eseguito la prova sopra i due materiali come visibile in figura (Fig 5.10), abbiamo realizzato la miscela ed effettuato i medesimi passaggi in stufa e di stagionatura. La verifica ci ha portato alla conclusione di rimuovere l'alluminio, e infatti la prima prova è stata realizzata mediante l'uso di solo OSB. Si è scelto di usare questo materiale rispetto al legno perché ci sembrava più consono a trasmettere il calore a tutto il campione e a resistere a una temperatura e umidità utilizzati, inoltre era un materiale di scarto usato come imballaggio e trasporto di merce, il quale abbiamo preso e reimpiegato attuando un atteggiamento il più possibile sostenibile. La seconda prova invece, come mostrato in Fig. 5.12, evidenzia l'OSB rivestito da un nastro in acciaio inossidabile, il quale ha garantito una superficie esteriore più rifinita del prodotto finale. Anche in questo caso nonostante si è ripensato alla tecnica di scassero, la rimozione delle pareti verticali dei due blocchi centrali ha causato la creazione di cricche che hanno fessurato il campione. In questa fase di sperimentazione abbiamo ipotizzato che il problema fosse concentrato nella progettazione dello stampo e si è proceduto con il pensare varie soluzioni, bensì la morfologia stessa o il materiale adoperato nella creazione dello stampo siano di cruciale importanza nei risultati finali, essendo prodotto artigianalmente,

le prime risposte sono state ottenute in seguito alle prove meccaniche realizzate dopo 28 giorni di stagionatura controllata della prova numero 1 (Tab. 28). Il valore medio ottenuto in seguito alla prova di resistenza a compressione di tre frammenti del campione 1 visibile in figura 5.11 è diventato pari a **1/6 della resistenza meccanica** ottenuta nei test meccanici svolti nella prima fase di laboratorio sui provini più piccoli.

Figura 5.10, Prova atta a verificare l'adesione/reazione della miscela all'OSB e all'alluminio.

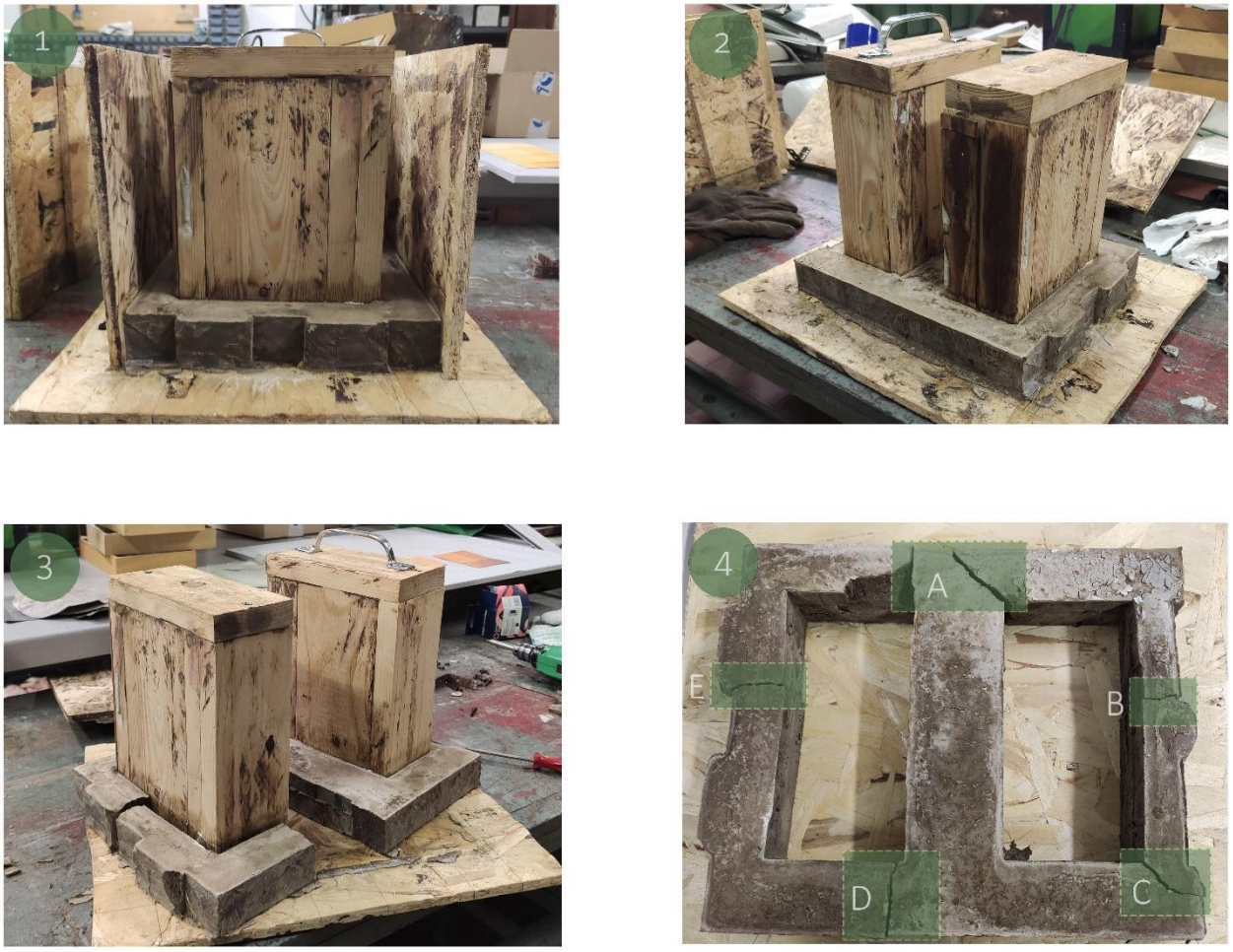


Figura 5.11, scassero relativo alla prima prova nello stampo in scala 1:1, nello step uno e due possiamo notare come la rimozione delle pareti verticali non abbia minimamente influito nella successiva rottura del campione, invece nello step tre è possibile vedere il risultato dovuto alla forza impressa nelle maniglie per cercare di rimuovere i parallelepipedi centrali. Nell'ultimo step sono evidenziate le 5 cricche di rottura, nelle anime più fini del manufatto e tendenzialmente sugli angoli.

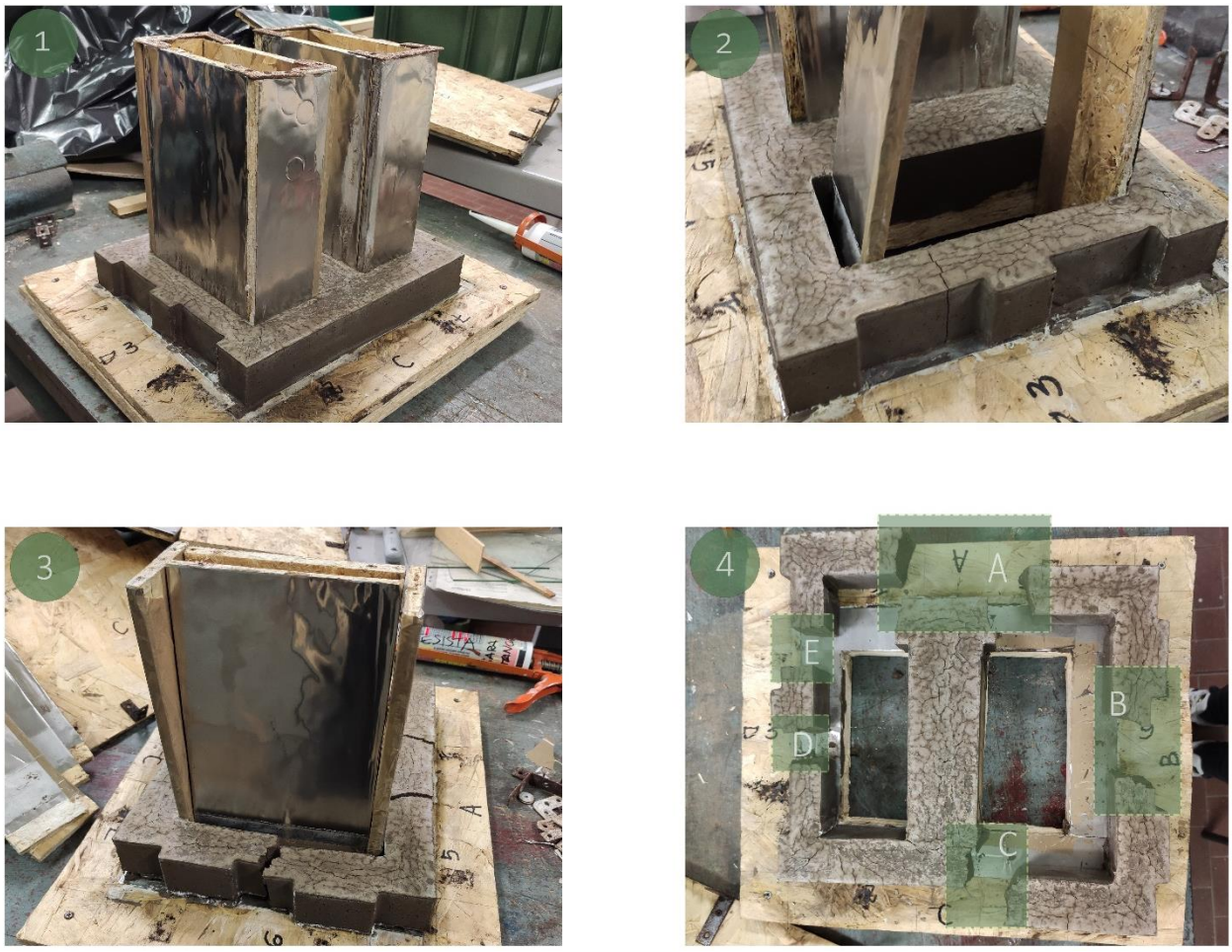


Figura 5.12, nel primo step si può evincere come la rimozione delle pareti verticali esterne non abbia causato nessuna crepa nel campione numero2, in sequenza negli step successivi si vede la creazione di cricche dovute alla pressione esercitata nella rimozione delle pareti verticali dei due blocchi interni arrivando al prodotto finale fessurato nuovamente in 5 punti.

Questo esito dovuto al passaggio di scala, ovvero di quantitativo % in peso di materiale utilizzato, ha evidenziato una duplice problematica influente sul risultato finale, ovvero non dovuta solamente dalla forma dello stampo bensì anche da una perdita di resistenza a compressione del materiale stesso una volta realizzato un significativo cambio di scala. Tra le due fasi di laboratorio la dimensione dei provini si è incrementata di 50 volte per arrivare al risultato finale desiderato, si sarebbe dovuta moltiplicare di 400 volte rispetto una miscela per un campione utilizzato nella prima fase sperimentale. Dopo aver analizzato i risultati dei test meccanici abbiamo deciso di approfondire la caratterizzazione dei materiali stessi in modo da carpire una possibile soluzione o risposta all'esito indesiderato. L'attenzione è stata rivolta nei confronti delle analisi precedenti sostenute, in particolar modo nella correlazione tra i dati di output dell'analisi granulometrica, citata nel capitolo 4, e le nuove analisi effettuate attraverso microscopio elettronico FE-SEM. Sono stati selezionati cinque campioni di materiale:

- Fango di segagione tal quale;
- Cocciopesto tal quale;
- Campione 75% fango e 25% cocciopesto (75%F + 25%C), relativo alla Tab. 26;
- Frammento della 1°prova in scala 1:1 caratterizzato come 75%F + 25%C, relativo alla miscela di Tab 28;
- Campione 25%F + 75%C, relativo alla Tab. 24.1.

Tali campioni sono stati prima trattati attraverso la creazione di un rivestimento (Fig. 5.13) in oro, e successivamente analizzati attraverso il microscopio elettronico a scansione con sorgente a emissione di campo FE-SEM.

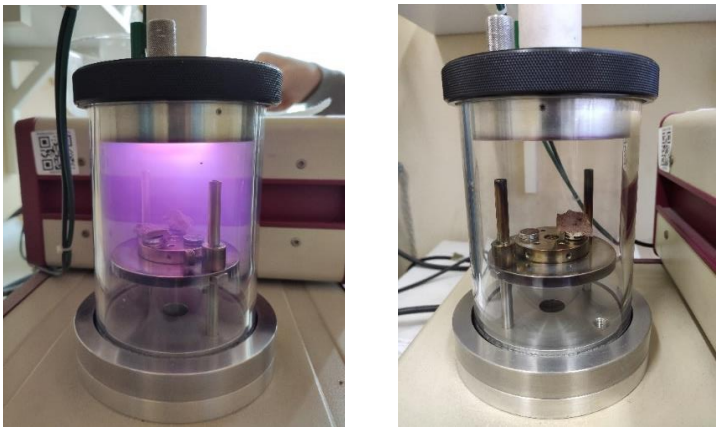


Figura 5.13, Sputter coater in funzione, SPI-MODULE**,** DISAT, fotografia autoprodotta.

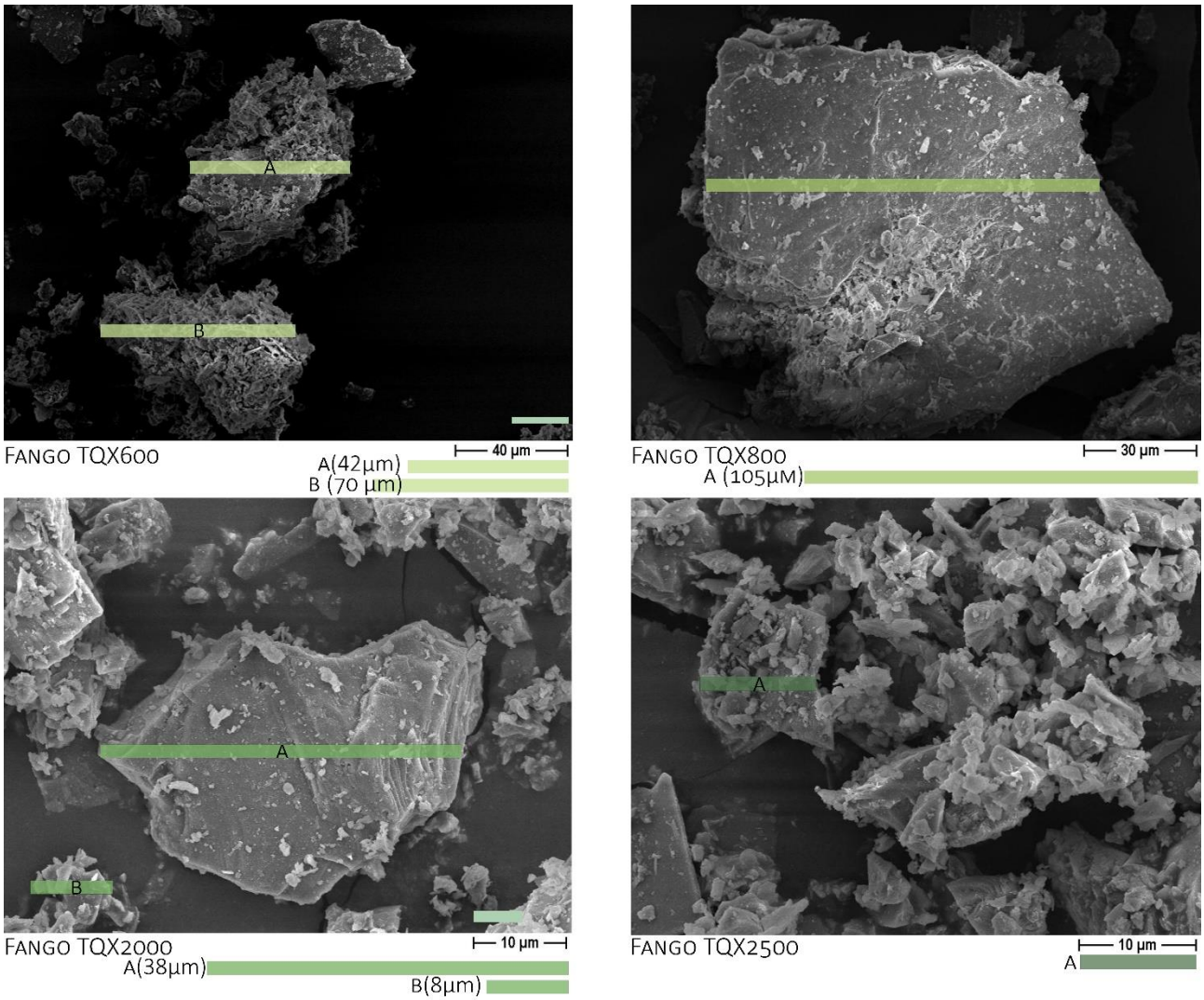


Figura 5.14, Immagini FE-SEM relative al campione 1 fango tal quale, in verde i segmenti di riferimento per confrontare la scala grafica espressa in micrometri e le dimensioni dei grani, immagine rielaborata personalmente.

I quattro zoom realizzati attraverso il microscopio (Fig. 5.14) mostrano una dimensione coerente alla caratterizzazione effettuata tramite la prima granulometria svolta nel capitolo 4 (Tab.30), i cristalli mostrano

una granulometria più fine e segmentata dovuta anche dalla tecnica manuale di macinazione, la quale proprio per tale motivo senza l'uso di setaccio, presenta una variazione dimensionale visibile sia in figura che nei dati elencati in tabella.

D10	D50	D90
3,55 µm	24,09 µm	86,36 µm

Tabella 30, Analisi granulometrica su fango tal quale (da analisi eseguita con granulometro laser).

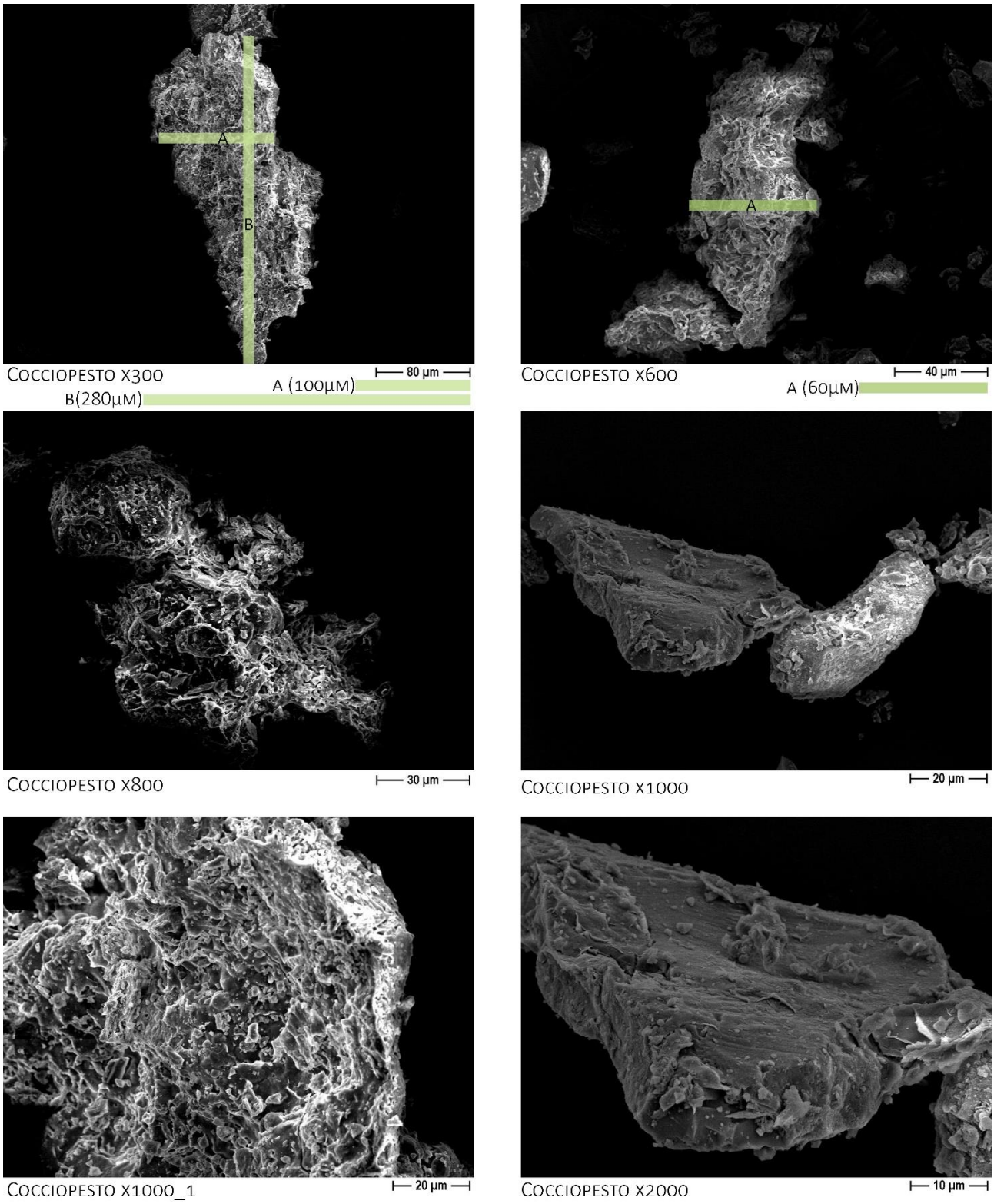


Figura 5.15, Immagini FE-SEM relative al campione 2 cocciopesto tal quale.

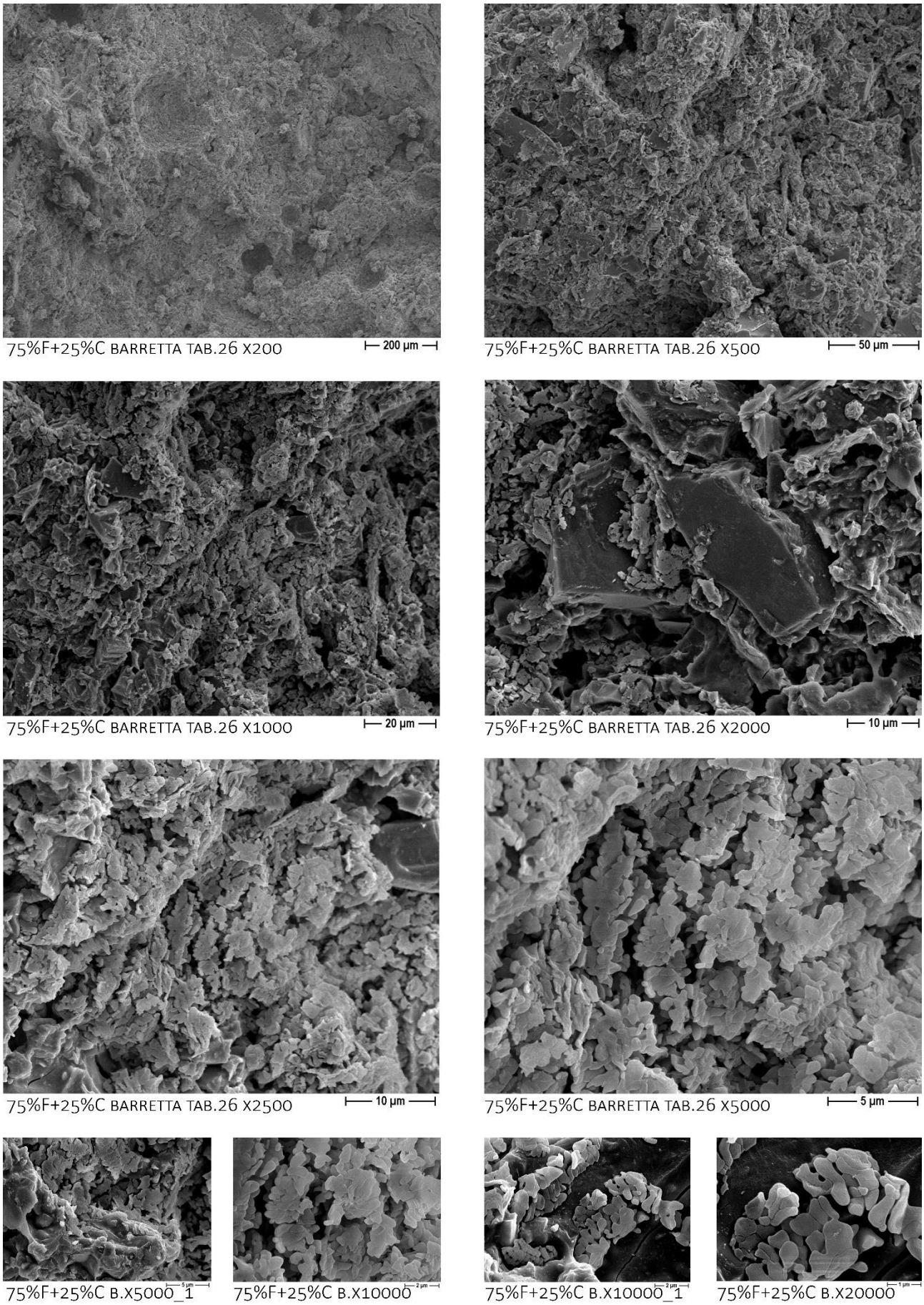
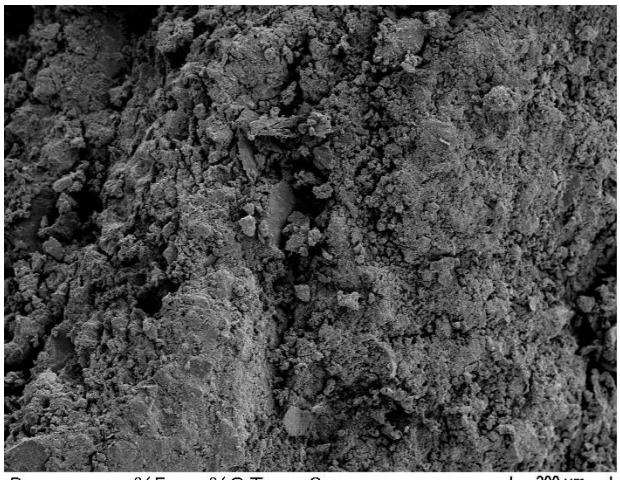
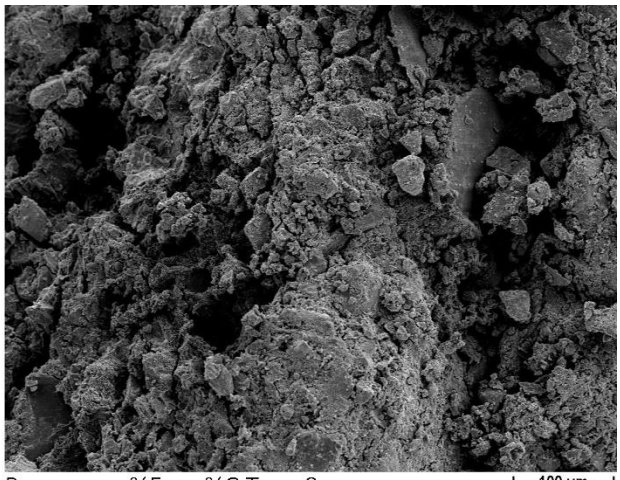
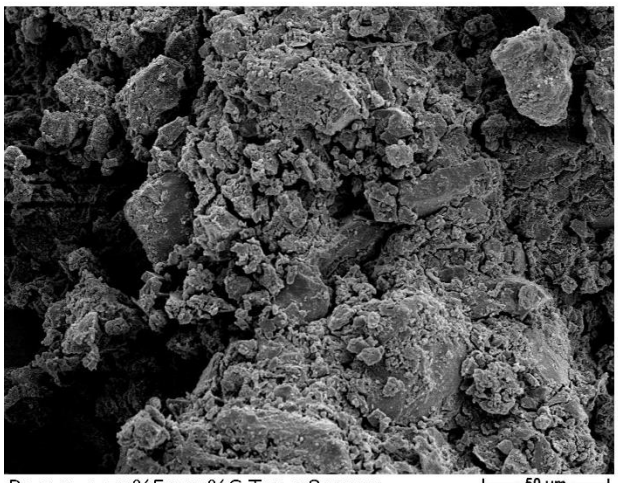
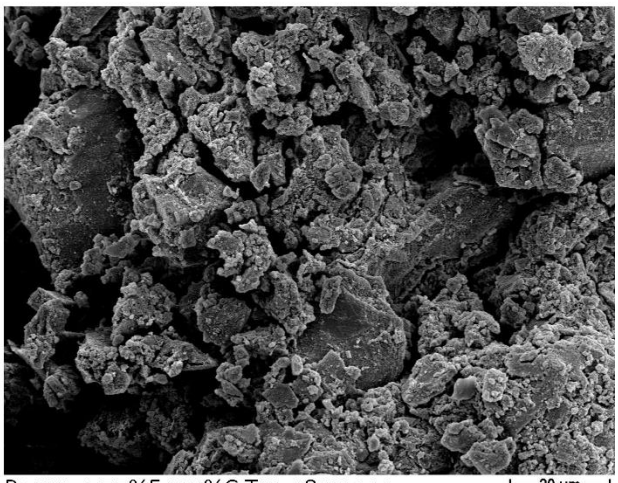


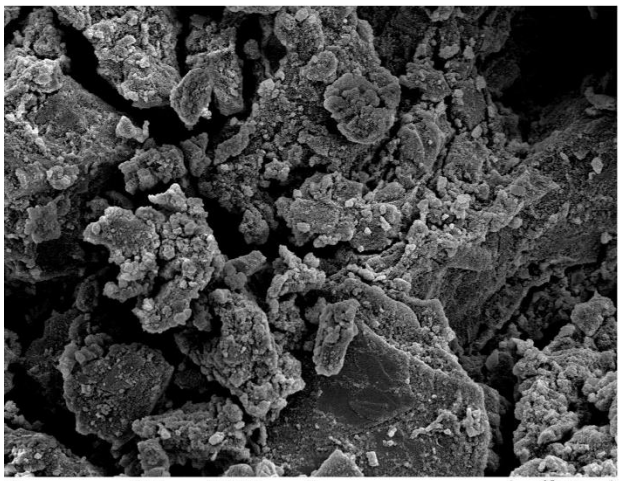
Figura 5.16, Immagini FE-SEM relative al 3°campione barretta 75%F+25%C, descritto in Tab. 26 (Cap.4).

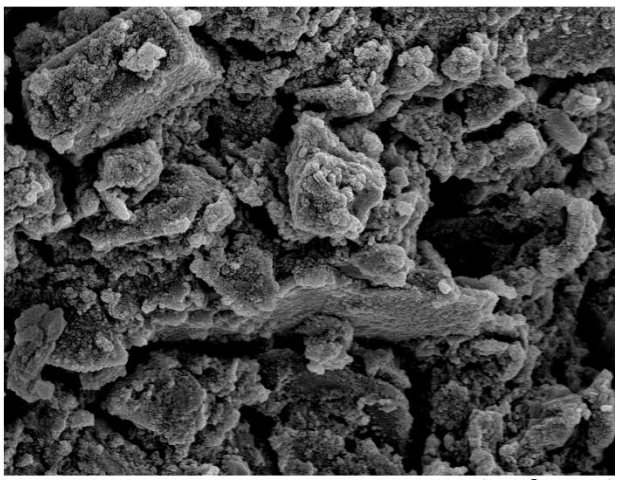


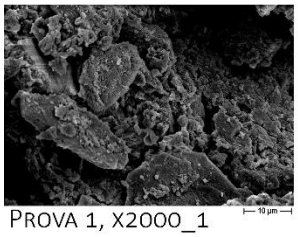


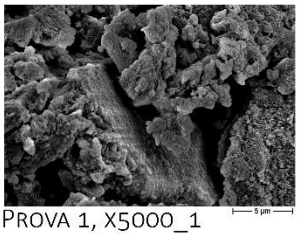


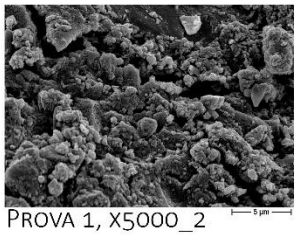












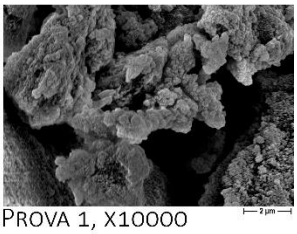
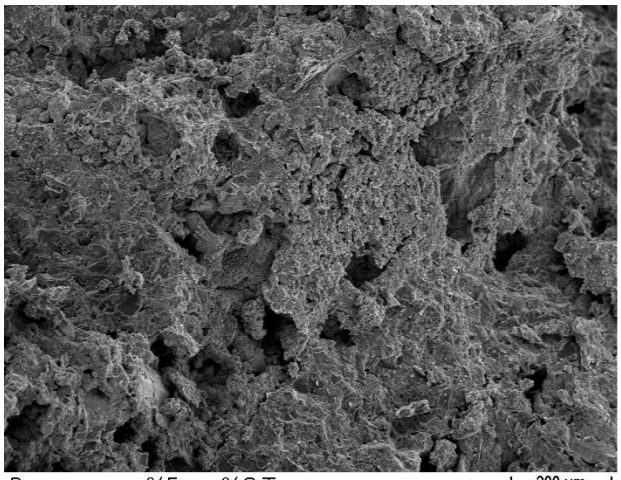
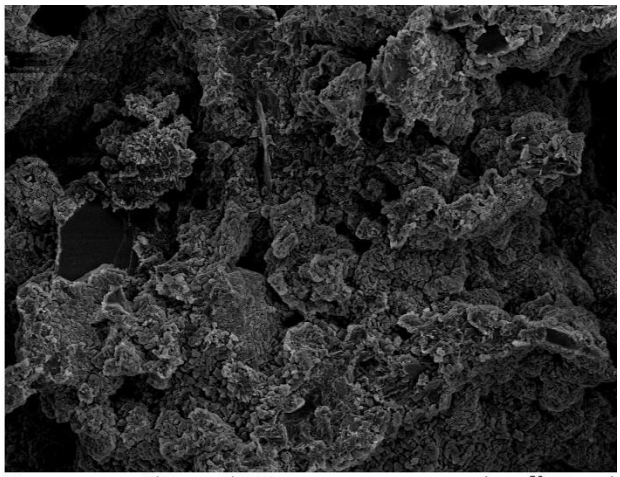


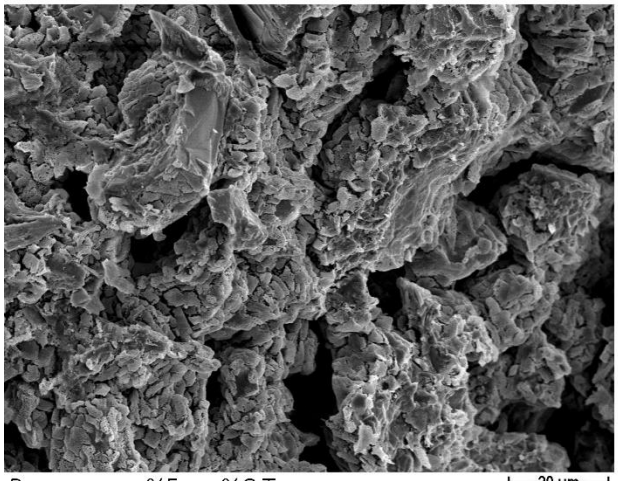
Figura 5.17, Immagini FE-SEM relative al 4°campione 75%F+25%C, descritto in Tab. 28 (Cap.5).



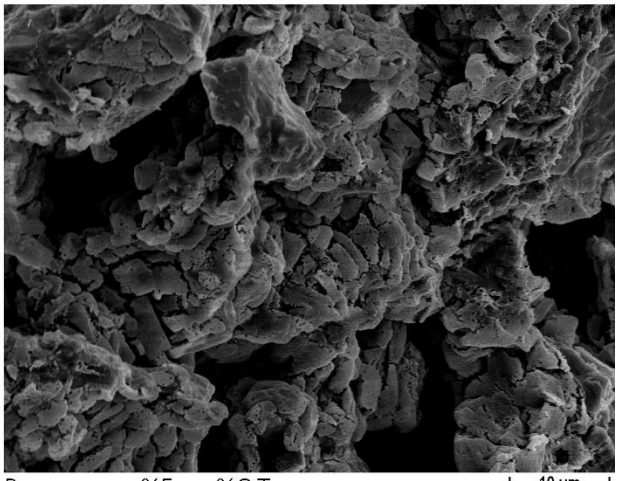
BARRETTA 25%F+75%C TAB.24.1 X100



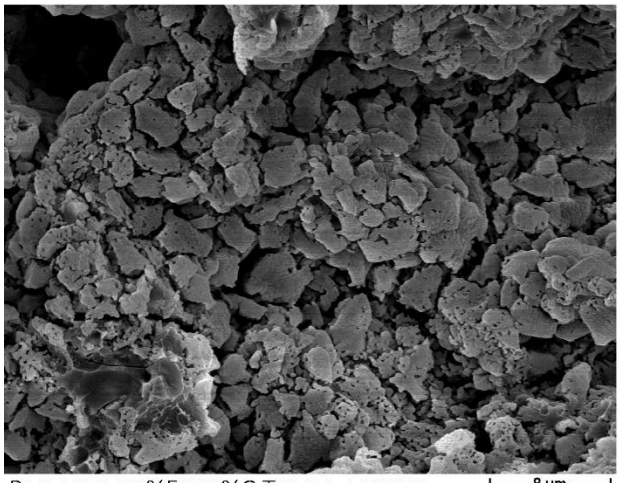
BARRETTA 25%F+75%C TAB.24.1 X500



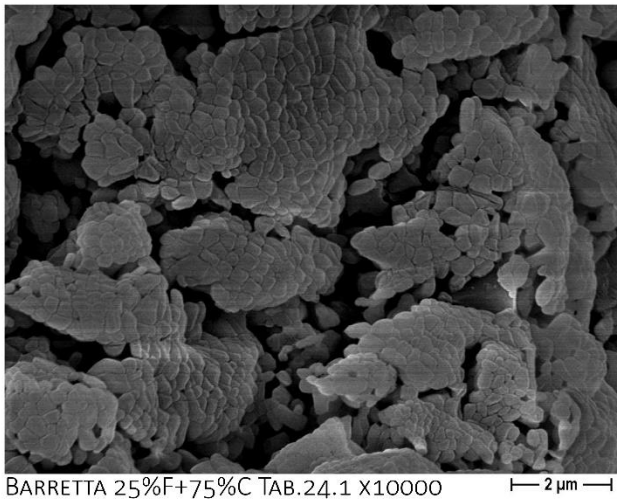
BARRETTA 25%F+75%C TAB.24.1 X1000



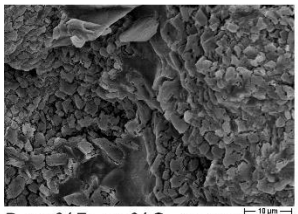
BARRETTA 25%F+75%C TAB.24.1 X2000



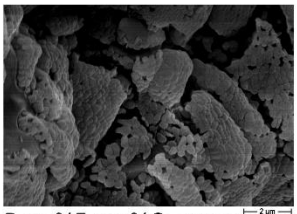
BARRETTA 25%F+75%C TAB.24.1 X3000



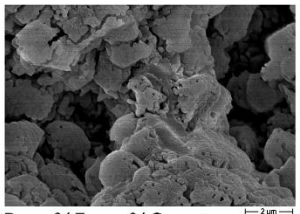
BARRETTA 25%F+75%C TAB.24.1 X10000



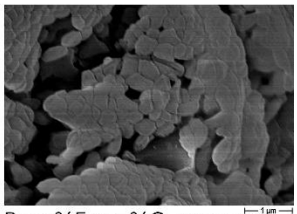
B.25%F+75%C, X2000_1



B.25%F+75%C, X10000_1



B.25%F+75%C, X10000_2



B.25%F+75%C, X20000

Figura 5.18, Immagini FE-SEM relative al 5°campione colato nello stampo in OSB 25%F+75%C, descritto in Tab. 24.1 (Cap.4).

In Fig. 5.15 le immagini relative al cocciopesto facilmente confrontabili, grazie alla presenza della scala grafica, alle altre. Si può osservare quanto la polvere sia meno fine rispetto il fango tal quale, il cocciopesto è costituito da dei grani di dimensioni maggiori. Successivamente in Fig. 5.16 possiamo notare le immagini relative al provino 75%F + 25%C la cui miscela è descritta in tabella 26, questa volta andando negli zoom più ravvicinati è possibile vedere la reazione avvenuta tra la soluzione attivante e il Fango, ipotizzando la non riuscita di una reazione tra la soluzione attivante e il Cocciopesto. Vi sono delle particelle piatte che non sembrano aver reagito con la miscela complessiva e andando a confrontare le Fig. 5.16 e 5.18 in cui sono analizzati i provini delle medesime dimensioni con percentuali invertite di Fango e Cocciopesto si può notare che all'aumentare della percentuale in peso di Cocciopesto aumenta anche il quantitativo di questi grani indefiniti piatti. Un risultato ancora differente è visibile nelle immagini relative alla prima prova nello stampo in scala 1:1 in cui il risultato finale è ancora diverso da quelli precedenti. Possiamo constatare che sebbene siano avvenuti i medesimi procedimenti e siano stati utilizzati gli stessi materiali, il passaggio di scala ha conferito problemi non solo dal punto di vista meccanico ma anche differenze dal punto di vista strutturale, confrontando due immagini tra la stessa miscela utilizzata con un quantitativo maggiore in Fig. 5.17 e un'immagine di Fig. 5.16 è impossibile riconoscere che sia lo stesso materiale. Queste analisi ci hanno aiutato a capire che la ricerca non ha ottenuto i risultati desiderati nella seconda fase di sperimentazione non solo a causa dello stampo realizzato bensì anche a un problema di miscelazione e polveri incongruenti con la soluzione attivante utilizzata per produrre un materiale alcali attivato. Nella seconda prova effettuata visibile in Tab. 29 ho constato che il blocco presentava un aspetto ancora umido e non pienamente stagionato tantè che ho preferito testare un solo frammento anzi che tre infatti l'esito riscontrato è stato inferiore alla prima prova in Tab.28. Ho provato a testare nuovamente un frammento della prima prova che da 28 gg di stagionatura è maturato sino ai 42 gg e ho riscontrato un aumento in Mpa della resistenza a compressione; tantè che ho deciso di testare nuovamente i provini con l'aumentare dei tempi di stagionatura fino agli ultimi periodi a disposizione prima della conclusione di suddetta tesi. Le tempistiche a disposizione per la conclusione di tale ricerca e la definizione stessa di quest'ultima, mi hanno portata a sospendere questo studio con questi risultati e il pronostico che siano il punto di partenza per nuovi obiettivi e traguardi da raggiungere.

6. CONLUSIONI

La formazione ricevuta nel percorso di laurea magistrale in architettura per il progetto sostenibile ha notevolmente incrementato il mio interesse nei confronti di tali tematiche. In particolare, le nozioni ricevute dal Professor Tulliani durante il corso di "Sostenibilità di processi e prodotti nei materiali per l'architettura" e la passione e l'entusiasmo del metodo e del lavoro del Professor Zerbinatti, conosciuto casualmente grazie a una collaborazione studentesca svolta; mi hanno accompagnata e indirizzata nell'approfondimento di suddetta tesi di studio.

La mia volontà personale era quella di realizzare uno studio concreto a cui seguissero dei risultati analizzabili, e in cui la tematica riguardante la sostenibilità fosse di primaria importanza. Il fango di segagione riassumeva tutti gli obbiettivi prefissati andando a rappresentare un rifiuto catalogato in quanto rifiuto speciale non pericoloso, la sfida nel reimpiegarlo in modo differente conferendogli un utilizzo meno infimo e più ricercato in quanto prodotto edilizio si presentava come sfida perfetta per concludere in modo differente il mio percorso di studio.

A seguire i concetti teorici vi sono due parti esecutive in cui si suddivide questo studio, la prima come abbiamo visto nel capitolo 4, svolta prevalentemente in laboratorio DISAT (Dipartimento Scienza Applicata e Tecnologia), in cui vi è la fase di ricerca e studio del materiale. Abbiamo eseguito diverse prove per conoscere e indagare il fango, in riferimento anche alla letteratura citata, abbiamo iniziato a realizzare dei campioni per poterne studiare il comportamento e poter ipotizzare una destinazione d'uso. Inizialmente l'attività di laboratorio era incentrata solo sul fango studiandone due possibili miscele una per la produzione di un campione denso e una destinata alla realizzazione di uno poroso, successivamente per incrementare le proprietà del materiale, sì è iniziato a sperimentare delle varianti con la loppa d'altoforno, l'argilla cotta e il cocciopesto. Abbiamo verificato attraverso i test e le prove descritte, quale fosse la soluzione più prestante e in linea all'atteggiamento sostenibile prefissato e grazie ai primi risultati positivi abbiamo deciso di affrontare una seconda fase di ricerca.

La seconda fase di sperimentazione in laboratorio svolta sia al DISAT che al DISEG (Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica) ha visto l'evoluzione del percorso precedente andando a definire che cosa volessimo realizzare e come, da questo fango di segagione alcali attivato. Abbiamo progettato e realizzato lo stampo per ottenere il blocco costituito da fango di segagione e cocciopesto, due sottoprodotti derivati da lavorazioni differenti, il primo dalla lavorazione delle pietre e il secondo dal recupero di materiale lapideo come mattoni e tegole di tetti. Il blocco realizzato doveva avere le caratteristiche morfologiche e dimensionali di un classico blocco per la realizzazione di chiusure verticali opache usato oggi giorno in edilizia, ma con parametri molto più sostenibili, in primo luogo un materiale reimpiegato da rifiuto a materia prima secondaria, un'energia incorporata minore rispetto a un normale cemento Portland, un materiale quindi più sostenibile, un'ottimizzazione della produzione dei rifiuti con tutti i costi connessi e la produzione di CO_2 legata a tali attività. Tutti aspetti positivi legati all'utilizzo e allo studio di nuovi materiali utilizzabili nell'edilizia, che purtroppo in questa seconda fase di studio non hanno raggiunto i requisiti necessari alla produzione dell'intero blocco. In seguito ai test meccanici di resistenza a compressione svolti nel capitolo 5, con il passaggio di scala da un provino di dimensioni minori a una scala 50 volte maggiore abbiamo ottenuto dei valori molto più bassi di resistenza a compressione del materiale. Inizialmente pensavo che questo dato fosse principalmente causato dalla creazione artigianale e manuale dello stampo, il cui montaggio e smontaggio non troppo facile e immediato potesse influire totalmente sul prodotto finale, ma in seguito a altre verifiche effettuate e confrontate a livello di granulometria, diffrattometria a raggi X e osservazione al microscopio elettronico, abbiamo capito che il problema non era dovuto solamente dallo stampo, bensì probabilmente dalla reazione del cocciopesto e del fango con la soluzione attivante.

Questa tesi di ricerca rappresenta solo un possibile inizio per un argomento così vasto e poco approfondito fino ad adesso, oggi si è arrivati sino questo punto, domani si vedrà.

7. ALLEGATI

7.1 ESITI TEST MECCANICI

Raccolta dei grafici relativi ai risultati più interessanti riscontrati durate la verifica a compressione delle miscele riscontrabili nel Capitolo 4.

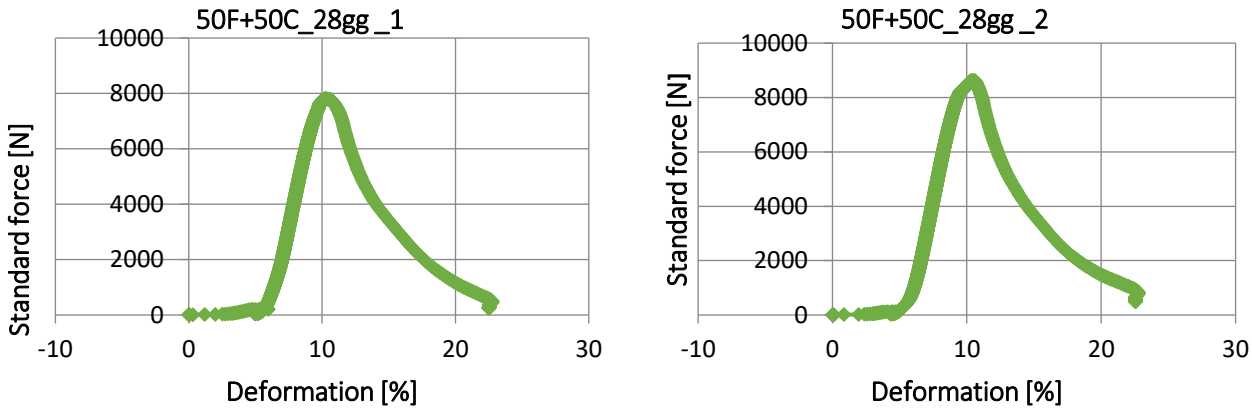


Figura 7.1, Curva sforzo deformazione relativa alla miscela 1 campione, 50%F + 50%C presente in Tab. 21, diagramma inerente alla resistenza a compressione del materiale. Grafici esportati dal programma Test Expert II.

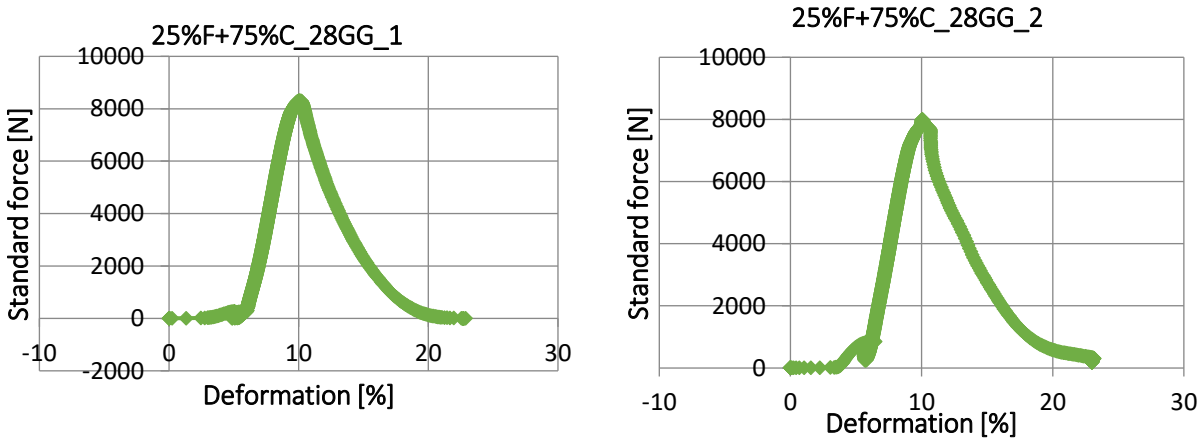
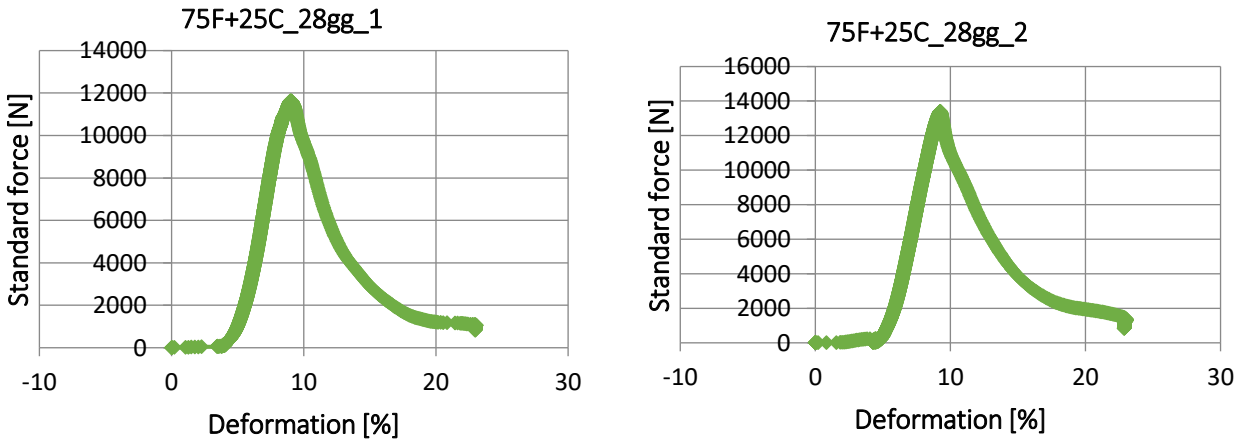


Figura 7.2, Curva sforzo deformazione relativa alla miscela 1 campione, 25%F + 75%C presente in Tab. 24.1, diagramma inerente alla resistenza a compressione del materiale. Grafici esportati dal programma Test Expert II.



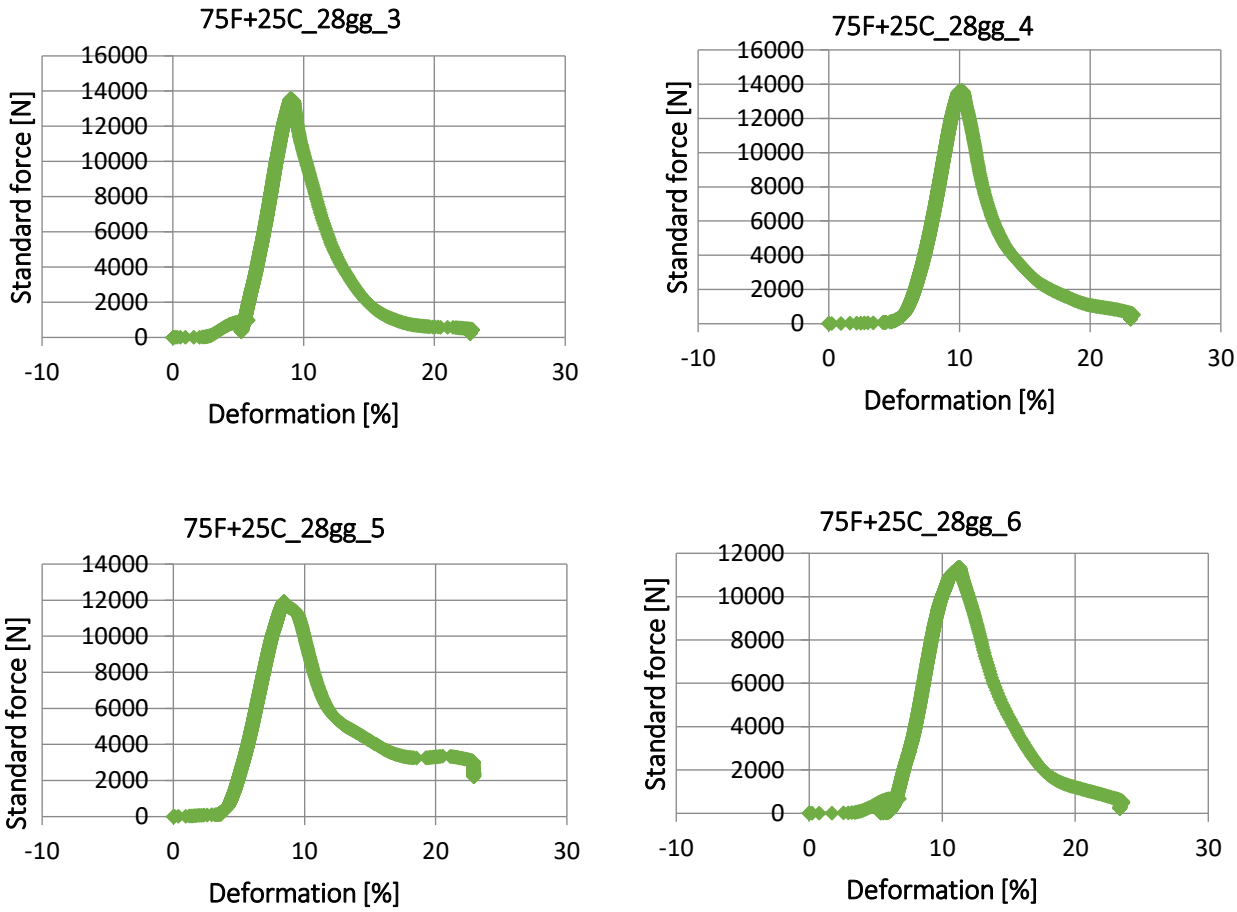


Figura 7.3, Curva sforzo deformazione relativa alla miscela 1 campione, 75%F + 25%C presente in Tab. 26, diagramma inerente alla resistenza a compressione del materiale. Grafici esportati dal programma Test Expert II.

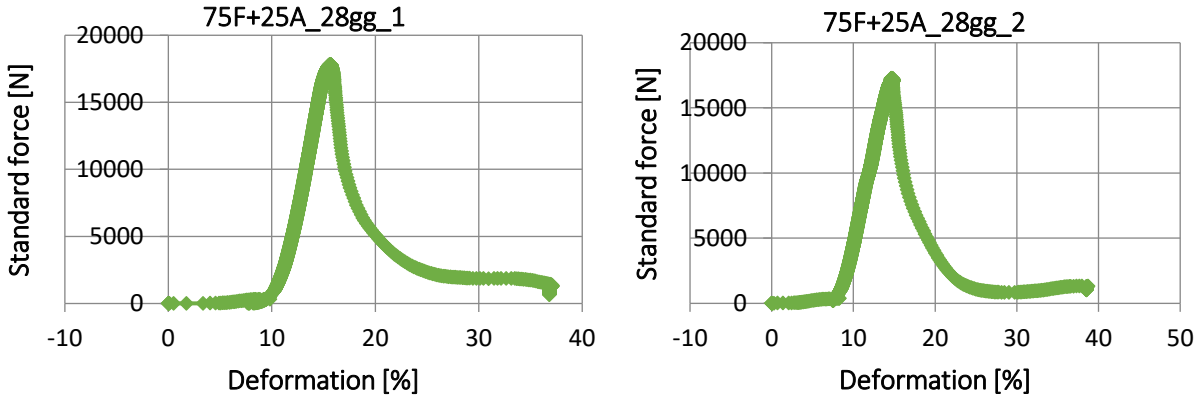


Figura 7.4, Curva sforzo deformazione relativa alla miscela 1 campione, 75%F + 25%A presente in Tab. 26.2, diagramma inerente alla resistenza a compressione del materiale. Grafici esportati dal programma Test Expert II.

Figura 7.5, Immagine autoprodotta relativa ai risultati presenti in Fig.7.6, frammenti rifilati e testati dai risultati visibili in Fig. 5.11.

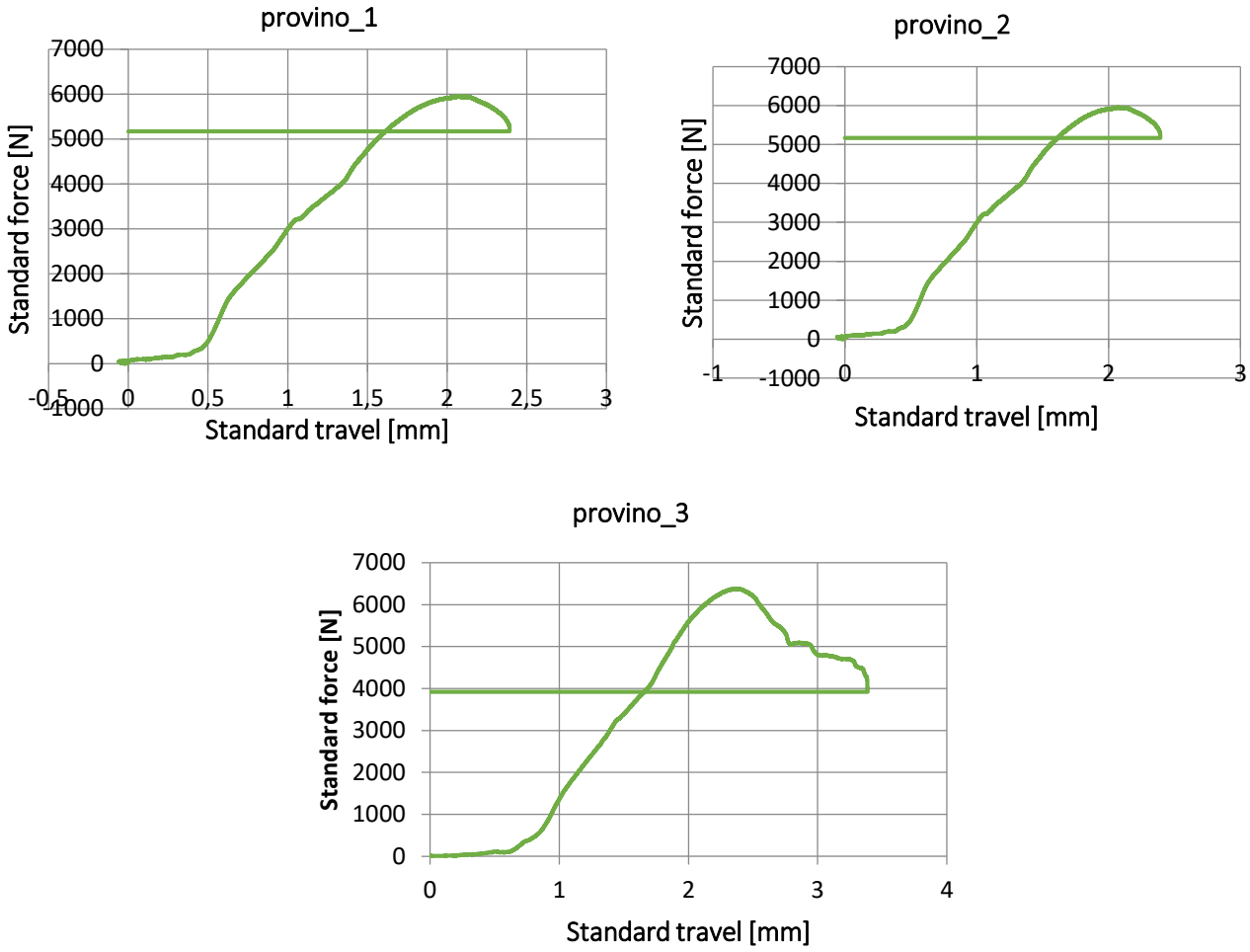


Figura 7.6, Curva sforzo deformazione relativa alla miscela 1° Prova, 75%F + 25%C presente in Tab. 28, diagramma inerente alla resistenza a compressione del materiale. Grafici esportati dal programma Test Expert II.

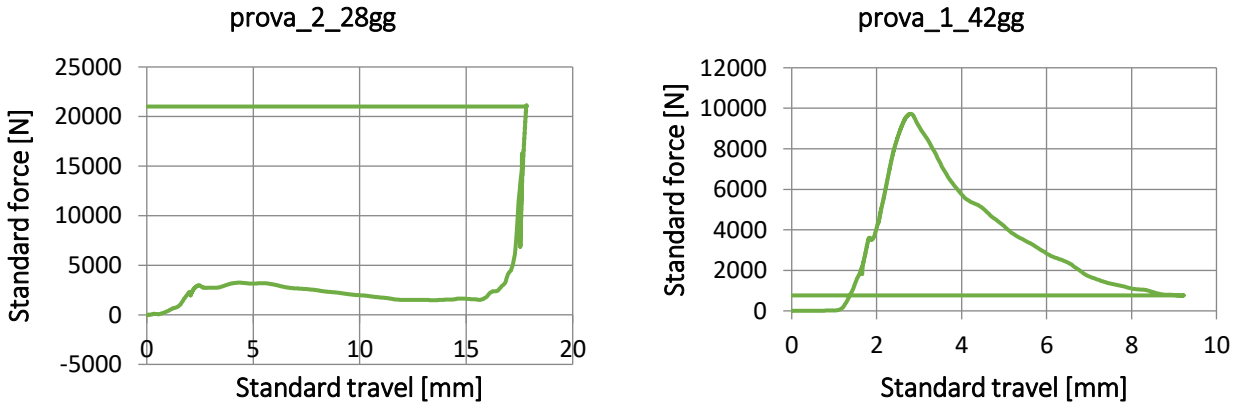
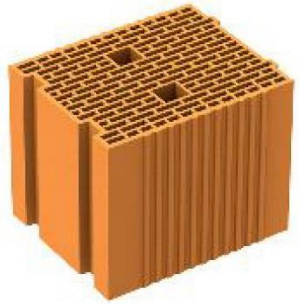


Figura 7.7, A sinistra, Curva sforzo deformazione relativa alla miscela 2° Prova, 75%F + 25%C presente in Tab. 29, diagramma inerente alla resistenza a compressione del materiale, considerare solo il primo picco relativo a uno sforzo di 3 kN, il secondo è un errore della verifica. A destra, Curva sforzo deformazione relativa alla miscela 1° Prova, 75%F + 25%C presente in Tab. 28, dopo 42 gg aumento di Rc confrontabile dalle Fig. soprastanti 7.6. Grafici esportati dal programma Test Expert II.

7.2 SCHEDA TECNICA POROTON P700

DANESI

NR625 - Poroton P700 TS 25.24,5.30 inc.25



LUGAGNANO VAL D' ARDA(PC)
via Oltre Arda 17 - 29018
Tel.0523.801020
e-mail: info@danesilaterizi.it

Caratteristiche generali	
Lunghezza	30 cm
Larghezza	25 cm
Altezza	24,5 cm
Percentuale di foratura	=55%
Pezzi per pacco	48
Peso dell'elemento	15 Kg
Peso pacco	724 Kg
Spessore muratura	**25 cm**
Pezzi al m²	13
Pezzi al m³	53

Caratteristiche strutturali	
Resistenza media a compressione nella direzione dei carichi verticali	11 N/mm²
Resistenza media a compressione nella direzione ortogonale ai carichi verticali	2,2 N/mm²
Campo d'impiego: Muratura portante in zona sismica 4 - Muratura di tamponamento	

Caratteristiche termiche	
Spessore muratura	**25 cm**
Conducibilità termica della parete con Collante Plan	W/mK
Conducibilità termica della parete con malta tradizionale	0,115 W/mK
Trasmittanza parete con malta tradizionale e intonaco tradizionale	0,418 W/m²K
Conducibilità termica della parete con malta termica DANESI MTM10	0,108 W/mK
Trasmittanza parete con malta termica Danesi MTM10 e intonaco tradizionale	0,395 W/m²K
Sfasamento (malta tradizionale - parete intonacata)	15,17 ore
Attenuazione (malta tradizonale - parete intonacata)	0,13 -
Trasmittanza termica periodica* (malta tradizionale - parete intonacata)	0,053 W/m²K
Massa superficiale al netto degli intonaci	220,3 kg/m²
Calore specifico	1000 J/kgK
Coefficiente di diffusione del vapore acqueo	5-10
* 1,5 cm intonaco interno (?=0,53 W/mK) + 1,5 cm intonaco esterno (?=0,82 W/mK)	

Resistenza al fuoco	
Spessore muratura	**25 cm**
REI	120
EI	240

Potere fonoisolante (calcolato con la legge della massa)	
Spessore muratura	**25 cm**
	48,8 dB

Capitolato

Danesi Poroton P700 TS 25.24,5.30 incastro 25 - Muratura in elevazione di spessore 25 cm, confezionata con blocchi in laterizio porizzato a setti sottili e con incastro verticale a secco. Dimensioni nominali 25x24,5x30 cm (altezza = 24,5 cm) e percentuale di foratura minore del 55%. Conducibilità termica della parete con malta tradizionale 0,115 W/mK, conducibilità termica della parete con malta termica Danesi MTM10 0,108 W/mK.

RINGRAZIAMENTI

Non sono una persona a cui piace ringraziare particolarmente, sono più incline all'individualismo delle proprie azioni però non posso fare a meno di ringraziarvi questa volta.

Vorrei ringraziare i professori Tulliani e Zerbinatti per avermi incoraggiata e accompagnata in questo periodo di tesi, tutti i membri dei vari laboratori che ho frequentato per la fase sperimentale, da Alberto Belli che è stato sempre presente e disponibile, a Gigi e Piero. Ringrazio anche i colleghi tesisti conosciuti durante questo percorso con cui ho condiviso perplessità e dubbi di svariato genere.

Ringrazio la mia famiglia che ha dovuto sopportare la parte più nervosa e isterica di me durante questo percorso, in particolare mio nipote Santiago che è sempre stato in grado di farmi staccare la spina e ricaricarmi e mia sorella Luana che insieme a Mamma, credono che io sia sempre la solita "secchiona".

Ringrazio tutti gli amici e colleghi conosciuti in ateneo che hanno sempre creduto in me, soprattutto Stefà, la Carolina Lucia e Ciccia.

Ringrazio i miei amici Marty e Miru che mi hanno sempre dimostrato stima e fierezza.

Ringrazio l'amica di sempre, quella che crede in me e lo dimostra da almeno vent'anni, Paola.

Un ringraziamento speciale al mio ragazzo Luca il mio primo sostenitore.