POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
Orientamento Strutture

Tesi di Laurea Magistrale

L'uso del Bio-char per calcestruzzi sostenibili e durevoli

Relatori:

Prof. Giuseppe Andrea Ferro

Dott.ssa Luciana Restuccia

Candidata:

Isabella Cosentino

Dicembre 2017

Alla mia famiglia

“L’uomo deve perseverare nell’idea che
l’incomprensibile sia comprensibile,
altrimenti rinuncerebbe a cercare”
J.W. Goethe

Ringraziamenti

Desidero subito esprimere un particolare ringraziamento al Prof. Ferro, relatore di questa tesi di laurea e fonte inesauribile di conoscenza, e alla Dott.ssa Restuccia, co-relatrice, per la loro disponibilità, per il tempo che mi hanno dedicato e per la fiducia che mi hanno dato fin dall'inizio, permettendomi di portare a termine il lavoro con entusiasmo e passione.

Un grande ringraziamento a mia madre e a mio padre che, con il loro dolce e instancabile sostegno, sia morale che economico, mi hanno permesso di affrontare questo percorso universitario con serietà e determinazione, contribuendo alla mia formazione personale e ai miei piccoli successi.

Ringrazio, poi, mio fratello per gli incoraggiamenti e gli utili consigli che mi ha fornito durante il mio intero percorso di studi e di vita, per i suoi innumerevoli elogi nei miei confronti, trasmettendomi sicurezza e facendomi sentire sempre fiera di me stessa.

Una dedica speciale alle mie amiche Oriana, Lavinia, Chiara che hanno condiviso con me gioie, sacrifici, sostenendoci a vicenda e rendendo questi anni ancora più preziosi.

Un ulteriore ringraziamento ai miei colleghi nonché compagni di studio, in particolare ad Angela, con cui ho potuto confrontarmi giorno dopo giorno creando così nuovi stimoli e rafforzando sempre di più il nostro rapporto.

Infine, dedico il mio lavoro ad una persona che proprio oggi avrebbe compiuto gli anni: mio nonno Pasquale che ha tanto e sempre creduto in me; per questo resterà una data ancora di più indimenticabile.

Sommario

La tesi di Laurea Magistrale si basa su una ricerca teorica e sperimentale sui calcestruzzi sostenibili e durevoli svolta presso il Politecnico di Torino in cui è coinvolta la CEMEX S.A.B. de C.V.

Il calcestruzzo è il materiale artificiale più prodotto e utilizzato nel mondo. Negli ultimi anni la produzione di cemento ha raggiunto i 4 miliardi di tonnellate, diventando un processo ad elevato consumo di energia. È una delle principali cause della produzione e dell'immissione di CO_2 nell'atmosfera, con gravi conseguenze sul riscaldamento globale e sui cambiamenti climatici.

Inoltre, la produzione di cemento richiede un largo uso di materie prime e un enorme consumo di combustibili solidi naturali.

Per questo motivo, si sta diffondendo sempre di più l'idea di calcestruzzi sostenibili, definiti come calcestruzzi che utilizzano materiali di scarto, almeno in uno dei componenti e/o non portano alla distruzione ambientale con il loro processo produttivo.

Nella letteratura si evidenziano sostanzialmente due modi per ottenere un calcestruzzo sostenibile e durevole: la sostituzione in parte delle materie prime e la sostituzione in parte del clinker con costituenti alternativi.

Il tema principale della presente tesi è l'uso del Bio-char, sottoprodotto del processo di pirolisi, nei compositi a base cementizia per ottenere materiali da costruzione con un miglioramento delle proprietà meccaniche quali resistenza, durezza, duttilità e, allo stesso tempo, un minor consumo di energia.

Nell'attività di laboratorio è stato aggiunto il Bio-char, finemente macinato, in percentuali diverse rispetto al peso del cemento. Dai risultati finali si è

potuto dimostrare che le nano / micro particelle pirolizzate sono molto utili per migliorare le proprietà meccaniche dei compositi a base cementizia contribuendo a produrre materiali da costruzione più sostenibili. Queste nano / micro particelle carbonizzate hanno un elevato rapporto area superficiale / volume (SA / V) che rappresenta una delle caratteristiche più importanti e desiderate nei compositi cementizi.

Dai risultati delle prove meccaniche (ad esempio prova di flessione su tre punti) è stato mostrato un promettente miglioramento della resistenza, della tenacità e della duttilità.

Inoltre, le particelle hanno la proprietà di deviare la traiettoria della frattura, generando un percorso molto più articolato e tortuoso e molto meno lineare rispetto alla tipica frattura fragile del cemento.

La forma molto irregolare fornisce, inoltre, una buona adesione con la pasta di cemento. Pertanto si avrà un aumento della superficie di frattura e di conseguenza crescerà anche l'energia di frattura.

È stato possibile normalizzare le modalità di utilizzo del Bio-char al fine di garantire la ripetibilità delle miscele di cemento.

Questo fatto potrebbe aprire interessanti scenari dal punto di vista della sostenibilità ambientale.

INDICE

Ringraziamenti vii
Sommario ix
0. IL RISCALDAMENTO GLOBALE 1
1. LA SOSTENIBILITA' 3
1.1 Sviluppo sostenibile 3
1.2 La sostenibilità nelle conferenze internazionali 8
1.3 Edilizia sostenibile 18
1.4 L'impatto dei materiali da costruzione e riciclo 21
2. IL CALCESTRUZZO 25
2.1 Il calcestruzzo e i suoi costituenti 25
2.2 I benefici ottenibili grazie all'utilizzo del calcestruzzo 30
2.3 Ciclo di vita e sostenibilità del Calcestruzzo 32
2.4 Il Carbon Footprint di Prodotto (CFP) 35
2.5 L'Embodied Energy 37
2.6 Nuove metodologie per produrre calcestruzzi sostenibili 39
3. IL CEMENTO 45
3.1 Dalla calce al cemento Portland 45
3.2 Ciclo produttivo del cemento Portland 49
3.3 Classi di cemento 54
3.4 Dal cemento al calcestruzzo 58
3.5 Il calcestruzzo 61
3.6 I costituenti del calcestruzzo e normative 63
3.7 Impatti ecologici 73
3.8 Cementi Alternativi 73
4. IL BIO-CHAR 79

4.1 La produzione del Bio-char 79
4.2 Le diverse applicazioni del Bio-char 83
5. MECCANICA DELLA FRATTURA 87
5.1 Introduzione alla frattura 87
5.2 Softening 88
5.3 Meccanica della frattura elastica lineare (LEFM) 92
5.3.1 Teoria della frattura di Griffith e Irwin 92
6. ATTIVITA' SPERIMENTALE 99
6.1 Introduzione 99
6.2 Materiali e Metodi 100
6.3 Prove 121
6.4 Risultati 130
Conclusioni e sviluppi futuri 132
Bibliografia e sitografia 134

0. IL RISCALDAMENTO GLOBALE

Dagli studi climatici si evince che il clima terrestre ha subìto diversi cambiamenti nell'arco della storia. Dagli esami geologici e dai carotaggi dei ghiacci artici, si è dedotto che le temperature terrestri sono mutate varie volte, anche con repentini cambiamenti. Queste variazioni sono collocabili in epoche arcaiche, ma anche negli ultimi secoli. Grazie a documenti storici si è potuto legare carestie e spostamenti di popolazioni ai fenomeni climatici. Da questo quadro molto complesso si osserva però che le cause potrebbero essere innumerevoli, alcune ancora da confermare e oggetto di studio. Ad esempio, sembra molto probabile che alcune eruzioni vulcaniche di grandi entità abbiano portato ad un calo delle temperature perché le loro emissioni di polveri, negli strati alti dell'atmosfera, hanno determinato un effetto schermo. Ma altre cause sono da ricercare in eventi astronomici, come i cicli solari: pare molto probabile che l'attività della nostra stella, che cambia nel tempo, con cicli più o meno regolari, possa irradiare maggiormente energia e di conseguenza riscaldare in modo variabile il nostro pianeta. Altre ancora sono da legare alle mutazioni di correnti oceaniche e alla variazione di salinità degli oceani.

Il quadro è molto variegato e di difficile comprensione, ma di certo mostra come il nostro pianeta sia sensibile a questi cambiamenti. Quello che però interessa maggiormente non sono gli eventi naturali, bensì quelli umani. Dall'industrializzazione in avanti l'umanità ha inserito, in queste dinamiche ambientali molto delicate, ulteriori fattori di criticità. I dati raccolti da vari ricercatori in diversi anni dimostrano ormai, senza ombra di dubbio, che l'attività umana ha drasticamente alterato le variabili climatiche.

Principalmente le emissioni di diossido di carbonio hanno provocato un effetto serra, con il conseguente aumento di temperatura media mondiale. L'inquinamento ambientale è certamente un altro allarmante aspetto, ma non introduce, come le emissioni di gas serra, criticità climatiche. Ed ovviamente il CO_2 (diossido di carbonio o anidride carbonica) non è l'unico gas problematico, ma certamente il più incisivo nelle mutazioni delle temperature terrestri. L'aumento della popolazione mondiale con la conseguente crescita di processi industriali e la diminuzione di foreste sono le con-cause principali dell'aumento di concentrazioni di CO_2. Infatti, i processi di fotosintesi clorofilliana nelle piante sottraggono anidride carbonica dall'ambiente e cedono ossigeno gassoso, ma la riduzione dei polmoni verdi planetari riduce questo contributo. Anche se in alcune aree limitate si sta verificando un aumento graduale di superficie boschiva, come in Scandinavia ed in Europa centrale (perfino in Italia), complessivamente il verde planetario si riduce. Invece, le emissioni continuano ad aumentare. Da queste semplici considerazioni nasce l'esigenza di ripensare le attività produttive e anche le attività di vita comune, perché non solo durante la produzione industriale si rilasciano molecole di anidride carbonica, ma anche in qualsiasi attività umana, dall'uso di una macchina a quello del riscaldamento, senza contare le attività metaboliche stesse che, però, sono decisamente le meno emissive.

Concentrando l'attenzione sulle attività umane, la costruzione edilizia risulta, insieme alla produzione industriale, l'aspetto che potrebbe meglio beneficiare, in un breve periodo, di miglioramenti atti a ridurre le emissioni di CO_2.

1. LA SOSTENIBILITA'

1.1 Sviluppo sostenibile

Da diverso tempo l'idea della sostenibilità è presente nel dibattito architettonico.

Il termine "sviluppo sostenibile" trae origine però dall'ecologia, dove la sostenibilità di un ecosistema è intesa come la sua capacità di rigenerare le biodiversità, in modo che un processo produttivo non sottragga le risorse naturali di questo sistema ad un ritmo superiore a quello della rigenerazione naturale.

Lo sviluppo sostenibile è una forma di sviluppo di tipo olistico[1], 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.

La sostenibilità riguarda quindi vari ambiti, come la scelta e l'origine dei materiali, l'energia consumata per il trasporto e la trasformazione, il processo costruttivo degli edifici. Una volta realizzata l'opera, la sostenibilità deve proseguire nella qualità delle performances termiche e nella quantità di energia necessaria per il suo funzionamento. In modo specifico, si deve consentire la possibilità di utilizzo di energie pulite, soprattutto quella solare per riscaldare, raffrescare, ventilare, illuminare naturalmente e accumulare energia elettrica. Anche i processi della manutenzione rientrano in quest'ottica, in funzione della maggior durata. E,

1 Dal greco "*olos*" cioè "tutto, intero, totale": si riferisce alla teoria dell'olismo, secondo cui le proprietà di un sistema non siano riducibili alla somma delle parti di cui è composto, poiché il tutto è più della somma di queste.

a fine vita, si dovrebbe pianificare la possibilità di trasformazione e di riciclaggio degli elementi costruttivi impiegati.

Precursori della moderna sostenibilità furono teorie economiche volte ad uno sviluppo umano sostenibile, nate anche diverso tempo fa. Le emergenze ambientali furono addirittura intuite da pensatori come Thomas Robert Malthus (1798), David Ricardo (1817) e John Stuart Mill (1848). Malthus fu tra i primi ad intuire il problema del rapporto fra aumento demografico e disponibilità di cibo, introdusse il concetto di vincolo di scarsità assoluta delle risorse. La visione Ricardiana fu più tenue, poiché sviluppò il concetto di scarsità relativa, sostenendo che la Terra fosse una risorsa praticamente inesauribile e che non si dovesse far altro che spostarsi in nuovi luoghi dopo aver esaurito le risorse in una data area. Pensiero che fu decisamente in voga fino all'epoca moderna. Mill vide, invece, nella scarsità fisica delle risorse naturali un limite insuperabile alla crescita economica e alla conseguente crescita della popolazione, non immaginando che l'umanità sarebbe però arrivata a 7 miliardi di individui, ancora in crescita, forse fino ai 10 – 11 miliardi.

Ma questi pensatori erano lontani dalle emergenze ambientali che si sarebbero generate tempo dopo. Solo verso la metà del XX secolo iniziarono a prodursi nuovi modelli economici, che si svilupparono in due filoni, uno riguardante l'economia ambientale e l'altro, partendo da discipline di vario tipo come la fisica, la sociologia e la biologia, produsse l'economia ecologica. Parallelamente, iniziarono i primi tentativi di sensibilizzazione dell'opinione pubblica. Nel 1968 l'imprenditore italiano Aurelio Peccei, insieme a politici, intellettuali e scienziati, fondò il "Club di Roma", associazione non governativa, avente lo scopo di informare sulla sostenibilità del modello economico. Nel 1972, nell'ambito delle iniziative,

dal Club fu pubblicato il libro “The Limits to Growth”, che racchiudeva uno studio realizzato da ricercatori del Massachusetts Institute of Technology che si avvalsero di un programma World3 col quale elaborare sviluppi futuri come la crescita della popolazione, i consumi energetici e alcune variabili ambientali e sociali. Gli allarmanti risultati si sono però mostrati in linea con le osservazioni reali di oggi. Aurelio Peccei proponeva, come condizione per la soluzione del problema, la capacità di previsione e programmazione a largo raggio e a lungo termine, e la “governance globale”.

Nel 1981 Lester Brown, uno dei massimi analisti dei problemi ambientali e di politiche agricole a livello internazionale, definiva una società sostenibile come “quella che soddisfa i propri bisogni, senza ridurre le prospettive delle generazioni future”[2].

Il concetto è stato introdotto dalla Commissione Bruntland (World Commission on Environment Development) nel Rapporto dal titolo “Our Common Future” redatto nel 1987 (Rapporto Brundtland, 1987). Il documento è incentrato sui rapporti tra ambiente e sviluppo e avanza proposte da mettere in atto da parte dei vari Governi e organizzazioni internazionali. Per la prima volta si affronta anche il legame che intercorre tra la tutela ambientale e lo sviluppo economico. Dopo aver esaminato lo stato del Pianeta, il rapporto promuove un nuovo modello di crescita che dovrebbe basarsi sullo sviluppo sostenibile. Il concetto si basa sull’idea che lo sviluppo presente non intacchi l’ambiente al punto da compromettere il godimento delle risorse ambientali per le generazioni future. Da questo momento, il concetto di sviluppo sostenibile avrebbe generato una

2 Brown Lester, 1981, Building a sustainable society, New York

normativa internazionale volta alla tutela ambientale e rispecchiato l'esigenza fondamentale per cui nelle politiche di sviluppo si dovesse contemplare anche la protezione della natura e dell'ecosistema. La Sostenibilità divenne quindi un concetto che si poggiava su tre gambe: l'ecologia, l'economia e l'equità sociale.

Alla fine degli anni 80 l'oncologo svedese Karl Henrik Robert spronò la comunità scientifica a dare una definizione sistemica di sostenibilità, in modo da comprendere sia aspetti ecologici sia sociali e rendere concreti i principi dello sviluppo sostenibile. Da quel processo emerse il Framework di Sviluppo Sostenibile Strategico, noto anche come "The Natural Stepframework". La prima azienda ad adottare il framework fu Ikea, dal 1990, seguita nei primi anni novanta da migliaia di organizzazioni nel mondo. Anche un quarto dei comuni svedesi adottano questa definizione per la loro pianificazione.

Una successiva definizione di sviluppo sostenibile, in cui è inclusa una visione globale, risale al 1991, ad opera di World Conservation Union (WCU), UN Environment Programme (UNEP) e World Wide Fund for Nature (WWF): "un miglioramento della qualità della vita senza eccedere la capacità di carico degli ecosistemi di supporto dai quali essa dipende".

Sempre nel 1991 l'economista ambientale Herman Daly introduce il principio di "equilibrio" tra uomo ed ecosistema: "il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve essere superiore al loro tasso di rigenerazione".

Quindi l'immissione di sostanze inquinanti e di scorie nell'ambiente non deve superare la capacità di carico dell'ambiente stesso. Inoltre, lo stock di risorse non rinnovabili dovrebbe restare costante nel tempo. Nel 1994 l'International Council for Local Environmental Initiatives (ICLEI)

fornisce un'ulteriore definizione di sviluppo sostenibile: “lo sviluppo che fornisce elementi ecologici, sociali ed opportunità economiche a tutti gli abitanti di una comunità, senza creare una minaccia alla vitalità del sistema naturale, urbano e sociale che da queste opportunità dipendono”.

Figura 1.1.1 I campi della sostenibilità

Il concetto è stato ampliato ulteriormente nel 2001 dall’UNESCO: "la diversità culturale è necessaria per l'umanità quanto la biodiversità per la natura (...) la diversità culturale è una delle radici dello sviluppo inteso non solo come crescita economica, ma anche come mezzo per condurre una esistenza più soddisfacente sul piano intellettuale, emozionale, morale e spirituale"[3].

La diversità culturale diventa il quarto pilastro dello sviluppo sostenibile, accanto all’equilibrio delle tre E: Ecologia, Economia, Equità sociale.

3 Art 1 e 3, Dichiarazione Universale sulla Diversità Culturale, UNESCO 2001

1.2 La sostenibilità nelle conferenze internazionali

L'Organizzazione delle Nazioni Unite ha promosso a livello internazionale diverse riflessioni su sviluppo e ambiente, soprattutto mediante la convocazione di grandi conferenze intergovernative. La prima fu la Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente umano (UNCHE, United Nations Conference on Human Environment) di Stoccolma nel 1972, nella quale parteciparono sia paesi già industrializzati che altri in via di sviluppo. Durante i lavori venne elaborato per la prima volta il concetto di sviluppo sostenibile. Si cominciò ad affermare l'importanza della gestione delle risorse naturali, per il mantenimento e il ripristino delle risorse rinnovabili. Fu quindi il primo incontro internazionale in cui si focalizzò l'attenzione sulla protezione dell'ambiente naturale. Nacque lo "United Nations Environmental Programme", il programma dell'O.N.U. relativo alle problematiche ambientali che si pose l'obiettivo di coordinare e regolare tutte le politiche ambientali delle Agenzie dell'O.N.U. La Conferenza si concluse con un documento noto come "Dichiarazione di Stoccolma", contenente i principi per la protezione ambientale e lo sviluppo umano che sarebbero dovuti esser presi dai vari governi come riferimento nelle proprie decisioni politiche.

Nel 1983 una risoluzione dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite istituì la "World Commission on Environment and Development" con l'obiettivo di elaborare un'agenda globale per il cambiamento, in grado di agevolare la cooperazione internazionale e promuovere la consapevolezza e l'impegno in materia ambientale, anche con la collaborazione di organizzazioni non governative, aziende e istituti di ricerca. La Commissione nel 1987 pubblicò il rapporto intitolato "Our Common

Future", di cui si è già accennato, conosciuto anche come "Rapporto Brundtland" che si concentrava sul legame fra il soddisfacimento dei bisogni umani e la responsabilità intergenerazionale.

Nel 1987 con il Protocollo di Montreal si decise la messa al bando dei gas dannosi per l'ozono stratosferico: i Cluoro Fluoro Carburi (CFC).

Nel 1988 avvenne la creazione dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)[4]. Il Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico è il foro scientifico formato da due organismi delle Nazioni Unite e L'Organizzazione Metereologica Mondiale (WMO) ed il Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) allo scopo di studiare il riscaldamento globale.

La tappa più importante fu rappresentata, però, dalla conferenza di Rio de Janeiro nel 1992, meglio conosciuta come "Summit della Terra" o United Nations Conference on Environment and Development (UNCED). Alla Conferenza sull'Ambiente e lo Sviluppo delle Nazioni Unite parteciparono 172 governi, 108 capi di Stato o di Governo e 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative. Si concluse con la stesura di diversi documenti ufficiali: la Dichiarazione di Rio sull'ambiente e sullo sviluppo; l'Agenda 21; la Convenzione sulla Diversità Biologica; i Principi sulle foreste; la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico che a sua volta portò alla stesura del Protocollo di Kyoto. Ci furono anche accordi riguardo la necessità di non installare attività produttive in terre abitate da indigeni per impedire il danneggiamento del loro ambiente.

L'Agenda 21 è il documento più corposo, ed è un insieme di intenti (40

4 www.ipcc.ch

capitoli), messi in agenda fino al XXI secolo per la realizzazione di uno sviluppo sostenibile. Ad esempio nel capitolo 28 si invita esplicitamente le autorità locali a promuovere lo sviluppo sostenibile, tramite un dialogare con i cittadini, le organizzazioni locali e le imprese private: “Attraverso la consultazione e la costruzione del consenso, le amministrazioni locali dovrebbero apprendere e acquisire dalla comunità locale e dal settore industriale le informazioni necessarie per formulare le migliori strategie “.
L'Agenda 21 è quindi un ampio ed articolato programma d’azione, che costituisce una sorta di manuale per lo sviluppo sostenibile del Pianeta per il XXI secolo.
Inoltre, fu approvato un importante accordo internazionale: la convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC).
Nel 1994, ad Aalborg in Danimarca, si svolse la Conferenza Europea sulle Città sostenibili, organizzata dal Consiglio internazionale per le iniziative ambientali locali (International Council for Local Environmental Initiatives ICLEI), sotto il patrocinio congiunto della Commissione Europea e della città di Aalborg. La Carta di Aalborg, fu il documento conclusivo della conferenza, ed è suddivisa in tre parti principali:

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

Venne firmata da 80 amministrazioni locali europee e da 253 rappresentanti di organizzazioni internazionali, di governi nazionali, e di istituti scientifici. Inizia quindi la “Campagna Europea delle Città Sostenibili” e le città e regioni europee si impegnano ad attuare l’Agenda 21 a livello locale,

elaborando piani a lungo termine per uno sviluppo durevole e sostenibile, in parallelo ad una campagna di sensibilizzazione.

La Conferenza delle Parti (COP) dell'UNFCCC iniziò incontri con scadenza annuale dal 1994. Durante la Terza Conferenza (COP3), nel 1997 a Kyoto, in Giappone, fu redatto il famoso "Protocollo di Kyoto", un trattato internazionale che stabilisce precisi obiettivi per i tagli delle emissioni di gas, responsabili dell'effetto serra e del riscaldamento del pianeta, sottoscritto da più di 160 Paesi. Prevedeva la riduzione complessiva del 5,2% delle emissioni mondiali alteranti nel periodo 2008-2012, rispetto ai livelli del 1990, con obiettivi differenti per i vari Paesi aderenti, sulla base del principio della "responsabilità comune ma differenziata".

I principali gas responsabili dell'effetto serra sono:

- Anidride carbonica: prodotta quando i vari combustibili fossili sono bruciati, ma anche dalle eruzioni vulcaniche, e dalla respirazione delle piante, degli animali e degli uomini.
- Metano: dovuto all'emissione dalle mine di carbone, alle perdite durante l'estrazione del gas naturale e del petrolio, e dal metabolismo degli animali ruminanti.
- Ossido nitroso: liberato dai fertilizzanti e da alcuni processi chimici.
- Idrofluorocarburi: usati in alcuni sistemi di refrigerazione, negli aerosol e nella fabbricazione di schiume isolanti.
- Idrocarburi perfluorati: usati nei climatizzatori, in alcune unità di refrigerazione e negli imballaggi alimentari.
- Esafluoruro di zolfo: usati nella metallurgia per la produzione di alluminio e Magnesio, nella fabbricazione di semiconduttori e nella costruzione elettrica

Ben 118 nazioni del mondo si impegnarono a ridurre le emissioni di questi

gas per rimediare ai cambiamenti climatici in atto. Gli Stati Uniti però non aderirono, essendo i primi produttori di gas serra nel mondo, avrebbero avuto gravi ripercussioni economiche. Ma perché il trattato potesse entrare in vigore, si richiedeva che fosse ratificato da non meno di 55 nazioni e che le nazioni che lo avessero ratificato producessero almeno il 55% delle emissioni inquinanti. L'obiettivo venne raggiunto nel novembre del 2004, quando anche la Russia aderì. Il trattato entrò in vigore il 16 febbraio 2005. Nonostante gli sforzi, gli obiettivi non furono raggiunti, e le emissioni di gas serra aumentarono costantemente, ed il riscaldamento globale e i conseguenti cambiamenti climatici peggiorarono.

Nel 2001, fu la volta della Convenzione di Stoccolma, che si pose come obiettivo l'eliminazione e la diminuzione dell'uso di alcune sostanze nocive per l'ambiente definite: inquinanti organici persistenti (POP). Sono composti chimici con proprietà tossiche che si propagano nell'aria, nell'acqua o nel terreno e, a causa della loro scarsa degradabilità, risiedono nell'ambiente per lungo tempo. Il documento riguarda 12 inquinanti principali: aldrin, clordan, dicloro difenil tricloroetano (DDT), dieldrin, endrim, eptacloro, mirex, toxafene, esaclorofene e tre famigli di composti: policlorobifenili (PCB), policlorodibenzodiossine (PCDD più comunemente detta diossina), e i policlorodibenzofurani (PCDF).

La convenzione entrò in vigore il 17 maggio 2004, ad essa aderirono 181 paesi tra cui gli stati membri dell'Unione Europea.

L'anno seguente 2002 venne convocato a Johannesburg, in Sud Africa, un nuovo vertice mondiale per fare il punto sulla situazione, il “World Summit on Sustainable Development”. Analizzando la situazione mondiale ci si rese conto che il degrado ecologico era appunto peggiorato. L’O.N.U. rilevò un sostanziale fallimento di risultati, e purtroppo Johannesburg non costituì a

sua volta un punto di svolta. Al Vertice Mondiale sullo Sviluppo Sostenibile parteciparono 189 dei 195 Stati membri dell'ONU, numerosi capi di Stato e di Governo, rappresentanti delle Organizzazioni Non Governative (ONG), del settore privato e di altri gruppi di interesse. Rappresentò l'occasione per riflettere su quanto iniziato al Summit di Rio nel 1992 e per realizzare gli obiettivi dello sviluppo sostenibile: l'adozione di un piano d'azione, sottoscritto da tutti gli Stati presenti, nel quale individuare i temi chiave per il decennio successivo. Sono state presentate una serie d' iniziative volontarie di collaborazione tra governi, istituzioni, imprese e società civile per dare concretezza al piano. Il rinnovato impegno dei leader mondiali a favore della lotta alla povertà attraverso uno sviluppo economico svincolato dal degrado ambientale e dal consumo esasperato di risorse.

L'Unione Europea mostrò in più riprese il suo intento ad attuare protocolli sostenibili, e nel 2006, il Consiglio Europeo adottò l'Agenda di Göteborg. La strategia, che sottolineava e rinforzava l'impegno di cooperazione sullo sviluppo sostenibile globale, era articolata in vari macro argomenti: i cambiamenti climatici e le energie pulite; i trasporti sostenibili; il consumo e la produzione sostenibile; la conservazione e gestione delle risorse naturali; la salute pubblica; le inclusioni sociali legate all'immigrazione; la povertà mondiale e sfide per lo sviluppo.

Un ruolo fondamentale, a sostegno della diffusione e del raggiungimento degli obiettivi di questa strategia, fu assegnato alla formazione e al maggior investimento nella ricerca e sviluppo, e all'Agenda 21 Locale. Lo scopo evidenziato era il raggiungimento degli obiettivi del protocollo di Kyoto. Si sarebbe dovuto lavorare in due direzioni: una il risparmio energetico attraverso l'ottimizzazione produttiva, sia degli impianti, che degli edifici, impiegando sistemi ad alta efficienza e l'educazione al consumo

consapevole. L'altra direzione sarebbe stata lo sviluppo delle fonti alternative di energia e la riduzione del consumo massiccio di combustibili fossili.

A seguito di questi impegni della sola Unione Europea, si giunse alla Conferenza di Copenaghen, nel 2009, 15ª Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP15, Copenaghen). Si cercarono di prevedere le strategie da adottare nel 2013, allo scadere del protocollo di Kyoto, e si cercò di modificare la posizione degli Stati Uniti, il cui nuovo presidente, Obama, era favorevole ad un ritorno al tavolo delle trattative.

Uno dei risultati della conferenza, fu l'intento di mantenere il surriscaldamento globale entro i 2 gradi celsius, rispetto ai livelli preindustriali.

I paesi ricchi s'impegnano quindi ad aiutare economicamente i più poveri stanziando 30 miliardi annui. Ci fu anche un impegno generico a disincentivare la deforestazione.

Ma viene rimandata alla COP16 (Cancun dicembre 2010) la stipula del trattato dopo-kyoto, nella Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC).

I Governi firmatari del Protocollo di Kyoto stabilirono la necessità del taglio delle emissioni di gas serra dal 20% al 40% entro il 2020 (rispetto al 1990 fissato come anno di riferimento). Il piano restò circoscritto agli aderenti al protocollo di Kyoto escludendo gli Stati Uniti, Cina e India che, pur avendo sottoscritto l'intesa, operarono in regime di deroga.

Le Parti istituirono un Fondo per il Clima, Green Climate Fund, gestito dalla Banca Mondiale, dal quale erogare finanziamenti pari a 10 miliardi di dollari l'anno (che arriveranno a 100 miliardi l'anno nel 2020) verso i paesi in via di sviluppo. I fondi servono al trasferimento di tecnologie pulite e al

contrasto della deforestazione. Tra le novità avvenne anche l'introduzione del meccanismo REDD+ (Reduction of Emissions from Deforestation and Forest Degradation) che contribuirà all'avvio di un nuovo tipo di cooperazione internazionale nel settore forestale.

Nel 2011 si tenne l'annuale Conferenza della Parti (COP17, Durban Sud Africa, Conferenza della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici UNFCCC). In questa sede si convenne che, entro il 2015, un gruppo di lavoro speciale avrebbe stilato un accordo per coinvolgere tutti i Paesi. Tale accordo sarà operativo prima del 2020. Fu inoltre prolungata la vita del Protocollo di Kyoto fino al 2017, l'adesione venne confermata però solo da Unione Europea, Svizzera, Norvegia, Australia e Nuova Zelanda, ma non degli Stati Uniti, responsabili di più di un terzo delle emissioni mondiali. La rettifica vide anche l'adesione di Cina e India, ma senza impegno di taglio di emissioni. Purtroppo invece si ritirarono la Russia, il Giappone e il Canada.

L'anno successivo, a Doha, capitale del Qatar, si svolte la 18ª Conferenza delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change, 2012, COP18), con l'obiettivo stringente di arrivare a impegni sempre più vincolanti per i singoli paesi. A Bangkok, durante il "Climate change talks", si sarebbero dovute definire le tematiche e gli obiettivi da discutere a Doha. Le riunioni non portarono però a rilevanti traguardi, i vari Stati rimasero sulle loro posizioni con scarso impegno nell'ambito del Protocollo di Kyoto, e non vi fu l'auspicata rapida attuazione della piattaforma di Durban approvata nel 2011.

Nel 2012 si tenne una nuova conferenza mondiale a Rio de Janeiro con la speranza e l'illusione di rinnovare gli sforzi e magari introdurre elementi innovativi. La "Conferenza Rio+20", tenutasi esattamente venti anni dopo

la prima conferenza di Rio, ha prodotto un documento di natura principalmente programmatica, intitolato “The Future We Want”. I due temi principali furono da un lato la “green economy”, e dall’altro la definizione di un sistema di governance globale per lo sviluppo sostenibile.
I problemi affrontati sono stati: la necessità di garantire posti di lavoro alla popolazione mondiale, la necessità di utilizzare energia rinnovabile ed a basso costo, lo sviluppo sostenibile delle città, il bisogno di produrre cibo a sufficienza per sfamare la popolazione, garantire il più possibile la reperibilità dell’acqua, la salvaguardia degli oceani e cercare di prevenire ed arginare i disastri ambientali oramai sempre più frequenti.
In seguito, nel settembre 2015, è stato adottato da parte di più di 150 leader mondiali il Documento “Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development”, un quadro di riferimento per aiutare tutti i Paesi a eliminare la povertà e a realizzare uno sviluppo sostenibile entro il 2030.
Ultima tappa di questo lungo percorso è stata la 21ª Conferenza delle Parti dell’U.N.F.C.C.C. (COP21) che si è tenuta a Parigi, in Francia, al finire del 2015. L’obiettivo della Conferenza è stato quello di concludere, per la prima volta in oltre venti anni di mediazione da parte dell’O.N.U., un accordo vincolante e universale sul clima, accettato da tutti gli Stati, e costituirà una tappa decisiva nei negoziati del futuro accordo internazionale per il dopo 2020. “Lo sviluppo sostenibile è lo sviluppo che soddisfa le esigenze delle attuali generazioni senza compromettere la possibilità di quelle future di soddisfare i propri bisogni. Il concetto di sostenibilità si riferisce a un uso della biosfera da parte delle attuali generazioni capace di mantenere il potenziale a beneficio delle future generazioni e a modelli di sviluppo economico in grado di evitare l’impoverimento delle risorse naturali e il degrado di quelle ambientali.» (tratto dal rapporto Brundtland: Our

Common Future). La conferenza ha prodotto l'accordo di Parigi, il cui testo rappresenta un consenso dei rappresentanti delle 196 parti partecipanti. L'accordo diventerà vincolante se ratificato da almeno 55 paesi che insieme rappresentino almeno il 55% delle emissioni globali di gas serra. Le parti dovranno firmare l'accordo che sarà adottarlo dai sistemi giuridici nazionale attraverso la ratifica.

Anche se in forte ritardo, la comunità internazionale inizia finalmente ad intervenire veramente. Ma anche se i miglioramenti a livello globale non si vedono, è vero che localmente in alcune nazioni si è fatto molto. Se confrontiamo le emissioni di gas CO_2 negli anni 1990 e 2012 osserviamo che in alcuni stati, come la Cina e l'India, sono molto cresciute, certamente a causa del forte sviluppo. Anche il consumo pro-capite è più che triplicato, del resto lo stile di vita di milioni di cinesi e indiani si è trasformato da contadino a cittadino, con conseguente incremento di consumi ed emissioni. Invece la situazione nell'Unione Europea è mediamente migliorata, certamente grazie a molti interventi locali e strutturali.

Tra i vari interventi atti alla riduzione delle emissioni serra, la creazione di un'edilizia a basse emissioni di carbonio rappresenta certamente una grande sfida del futuro. Anche la Commissione Europea ha evidenziato questa tematica nella Direttiva sul Rendimento Energetico nell'Edilizia (2002/91/EC), il settore residenziale ed il terziario pesano per circa il 40% sul consumo di energia finale dell'Unione Europea, dato in crescita, con conseguente aumento di emissioni di anidride carbonica. Il settore delle costruzioni deve quindi migliorare puntando sull'innovazione e sulla tecnologia, ma anche sulla progettazione.

Lo sviluppo sostenibile dovrebbe soddisfare i bisogni legati alla crescita produttiva, senza compromettere gli sviluppi futuri e senza intaccare in

modo irreparabile l'ambiente. Questo concetto è preso in considerazione, a livello europeo, dal comitato tecnico del CEN[5], inserendo, negli aspetti normativi dell'edilizia sostenibile, fattori economici e sociali. In questo modo, la fase di costruzione può portare ad importanti risparmi energetici, sempre che in fase di progetto sia presa in considerazione la gestione di tutto il ciclo di vita dell'edificio. Il risparmio energetico porta automaticamente anche ad una riduzione delle emissioni di CO_2.

1.3 Edilizia sostenibile

I concetti di sostenibilità devono innanzitutto venir applicati alla progettazione di edifici. Rispecchiando le varie definizioni precedenti, un edificio sostenibile dovrebbe essere un sistema in grado di mantenere costanti proprie prestazioni nel tempo con un ridotto consumo di energia e di materiali. Coinvolgendo aspetti legati all'ambiente, all'efficienza energetica, al consumo di acqua, alla qualità della vita degli occupanti, alla durabilità, al rapporto tra i costi e benefici e ai materiali da costruzione.
Il percorso storico e culturale verso la sostenibilità incontrò varie impostazioni fino a produrre differenti pensieri di applicazione.
Uno degli approcci più importanti si trova nell'Architettura ecologica, dove la responsabilità ambientale (eco = oikos = ambiente) si fonda sulle direttive indicate nel 1992 dalla Conferenza ONU sullo Sviluppo Sostenibile. L'architettura ecologica, o attività costruttiva sostenibile, fa riferimenti direttamente agli aspetti socio-economici. Le tematiche prese in considerazione vanno dall'inquinamento interno agli edifici, generato da

5 Gli standard europei prodotti dal CEN sono normalmente armonizzati e adattati dai singoli paesi che li accolgono come per esempio l'UNI in Italia. (fonte wikipedia).

vernici o dai prodotti usati in edilizia, al ciclo di vita dei materiali e dei componenti, fino al comportamento energetico degli edifici e delle soluzioni tecnologiche. Si passa attraverso la valutazione eco-economica delle fasi di realizzazione e dell'impatto sull'ambiente dell'opera realizzata. Nella stessa fase progettuale può essere previsto il riuso e il riciclaggio dei componenti impiegati. Quindi è importante la ricerca di materiali più idonei rispetto a quelli utilizzati su larga scala, che impiegano sostanze dannose per la salute o per l'ambiente e non facilmente usabili per il riciclo.

Un altro paradigma importante è quello alla base dell'architettura bioclimatica, che prevede il progetto dei edifici differenti a seconda dell'ambiente circostante in cui collocare l'opera architettonica. Fino alla metà del ventesimo secolo prevaleva la convinzione che gli edifici potessero essere pressoché identici, anche se in luoghi climaticamente diversi, ovviamente la climatizzazione aveva il compito di mantenere internamente il confort, con dispendi energetici considerevoli. Dalla crisi energetica degli anni ‘70 in poi, i progetti iniziarono a tener conto delle caratteristiche climatiche del sito e all'uso di risorse energetiche rinnovabili. Si svilupparono quindi studi tecnici opportuni per sfruttare l'ambiente circostante, in modo da raggiungere un benessere interno agli edifici anche ricorrendo agli elementi naturali come il sole, il vento, l'acqua, il terreno e la vegetazione. L'approccio bioclimatico è legato al principio di autosufficienza e alla consapevolezza che l'edilizia è un settore inquinante, anche e soprattutto a causa delle emissioni dei gas e di CO_2 che proviene proprio dagli impianti di climatizzazione e di riscaldamento.

Sull'onda di questi pensieri, nasce e si sviluppa in Germania la Bioedilizia[6], che racchiude i processi e metodi edilizi rispettosi della salute umana, per produrre e usare materiali di origine naturale e a basso impatto ambientale. Il merito principale dell'idea è di aver spostato il progetto dall'oggetto costruito all'uomo che lo abita, occupandosi quindi delle condizioni di benessere fisico ma anche psichico.

L'Edilizia sostenibile o l'Architettura sostenibile si sforza di avere una visione sistemica il più ampia possibile, che tratti il problema del costruito nel suo insieme, considerando il rapporto tra la funzione dell'opera per l'uomo e l'ambiente in cui è collocata. Si è quindi giunti a delineare una serie di principi che possano guidare le scelte normative locali verso una programmazione delle politiche concernenti l'edilizia[7]:

- ricercare uno sviluppo armonioso e sostenibile nel territorio e nell'ambiente urbano;
- tutelare l'identità storica delle città e la tradizione degli edifici;
- contribuire al risparmio energetico e all'utilizzo di fonti rinnovabili;
- applicare tecnologie edilizie sostenibili ambientalmente ed economicamente;
- utilizzare materiali di qualità certificata ed ecocompatibili;
- progettare soluzioni differenziate per rispondere alle diverse richieste;
- garantire gli aspetti di sicurezza e salubrità dell'edificio;
- promuovere la formazione professionale, per compiere scelte consapevoli.
- applicare la domotica per ampliare la qualità dell'edificio.

6 Dal termine tedesco "bau biologie" "costruire biologico" utilizzato dall'Istituto Indipendente di Ricerca fondato nel 1976 a Neubern (Germania).

7 G. Scudo, 2002

1.4 L’impatto dei materiali da costruzione e riciclo

La progettazione sostenibile deve ridurre sempre più il peso che l'edilizia ha sull'ambiente. Gli edifici hanno un rilevante impatto. Infatti, si stima che circa il dieci per cento dell’economia mondiale ruoti intorno agli edifici, considerando la fase di realizzo, di arredamento e di funzionamento. Vi è un enorme consumo di risorse: un sesto delle acque dolci al mondo sono impiegate nel settore, un quarto dei legnami vengono utilizzati in architettura, addirittura i due quinti delle materie prime e dell'energia sono assorbite dal settore e dai suoi indotti, e vengono impiegati due noni di pietre, ghiaia e terra grezza. Ogni anno tre miliardi di tonnellate di materie prime vengono trasformate in fondazioni, pareti, condutture e finiture. Ne consegue un enorme inquinamento nell'aria e nell'acqua. Inoltre, la ridotta disponibilità di alcune materie prime, come il granito e marmo, ne aumenta il costo. Le innumerevoli quantità di energia elettrica impiegata causano anche inquinamento dell'ambiente ed emissioni di gas a effetto serra, generando metà delle emissioni globali di gas a effetto serra.

La manutenzione o la sostituzione porta ulteriori consumi, e la demolizione spesso produce materiali da discarica riciclabili con difficoltà.

Una costruzione sarà tanto più sostenibile quanto più riesce ad impiegare materiali che minimizzano l’uso delle risorse naturali, che siano durevoli nel tempo con pochi interventi manutentivi e che, magari, siano riutilizzabili. L'impiego di materiali rinnovabili, come le fibre vegetali, la lana e il legno, incide meno sulla riduzione delle risorse non rinnovabili. La progettazione impiega sempre più materiali presenti nelle vicinanze dei cantieri, sia per ridurre i costi di trasporto, ma anche per limitare i consumi energetici. Inoltre, l'uso di materiali contenenti parti riciclate riduce i rifiuti

solidi e limita il consumo di materie prime. L'impiego di materiali riciclabili si rivela fonte di risparmi economici ed energetici. L'edilizia fa largo uso di vari tipi di materi prime, non si deve pensare solo alle pietre, ai mattoni e ai calcestruzzi, me anche ai metalli, alle plastiche e ai vetri.

In vetta al riciclo c'è sicuramente il legno, specialmente se massiccio: può essere sottoposto a nuove operazioni di segatura e divenire un componente multistrato per pannelli, infissi o battiscopa. Gli elementi biodegradabili come il tavolame, o la canna palustre, la canapa, la lana, la paglia e i mattoni crudi, sono tutti facilmente riciclabili. Il vetro è completamente riciclabile se separato ed incontaminato e, dopo la fusione, può essere riutilizzato, ma si risparmia solo un venti per cento di energia. Anche i metalli come l'acciaio, l'alluminio e il rame sono riciclabili se già separati. Le barre di acciaio presenti nel calcestruzzo armato richiedono operazioni di frantumazione molto più lunghe di quelle per essere liberate. Il riutilizzo dell'acciaio riduce dal cinquanta al settanta per cento l'energia utilizzata nei processi di produzione e quindi limita l'inquinamento. Anche per l'alluminio si ha una forte riduzione dei consumi nella fase della fusione, fino all'ottanta per cento dell'energia; attualmente, circa la metà dell'alluminio proviene dal riciclo. Invece, i materiali per la muratura, i calcestruzzi e le argille presentano maggiori difficoltà ma, se ridotti in frammenti, possono sempre essere usati come riempitivi granulari (es. sottofondi stradali). Anche la pietra, se non riutilizzata, può essere facilmente frantumata in ghiaia. I laterizi e i calcestruzzi devono seguire processi di trasformazione, ma hanno poi un'ottima possibilità di reimpiego.

Purtroppo le materie plastiche sono quelle che presentano più criticità, a meno che facilmente separabili da altri materiali, ma sovente sono

contaminate da additivi, rivestimenti e coloranti. La modalità di riciclo delle plastiche passa attraverso il loro uso come materia prima secondaria, per ottenere profilati, tubi, vasi, telai, innaffiatoi, quindi non si può fondere come il vetro ed averne un uso quasi identico. Però, in alcuni casi, le plastiche possono essere scomposte nei loro componenti gassosi per produrre metanolo o gas di sintesi. Nei casi peggiori, queste sono bruciate negli inceneritori e la reazione esotermica libera calore, permettendo un risparmio di petrolio o altro combustibile fossile.

Ci sono anche materiali che non si possono in alcun modo riciclare, come le pitture sintetiche, i collanti, i mastici e le schiume. Per questi si procede alla distruzione.

Le normative dei vari enti locali prevedono obblighi di riciclo e smaltimento ai quali le imprese edili devono attenersi, anche se sovente le macerie di cantiere comportano un costo elevato tuttavia necessario per la sostenibilità.

2. IL CALCESTRUZZO

2.1 Il calcestruzzo e i suoi costituenti

Il calcestruzzo è il materiale più utilizzato sul pianeta, con un consumo mondiale stimato in 4,5 miliardi di tonnellate[8].

Il settore del calcestruzzo ha come obiettivi sostenibili il miglioramento e l'aumento della durata di vita delle strutture e la conservazione dell'energia negli edifici e, infine, la riciclabilità dei materiali utilizzati. Il calcestruzzo viene prodotto utilizzando aggregati grossi come ghiaia o rocce frantumate e aggregati fini come sabbia, poi, acqua, cemento e prodotti derivati da altri processi industriali (loppa, ceneri volanti e fumi di silice) e infine additivi (che sono prodotti chimici, aggiunti in piccole quantità). Alcuni di questi materiali sono facilmente disponibili, ma possono essere sostituiti utilizzando prodotti da calcestruzzo riciclato. Durante l'impasto sono miscelati insieme gli aggregati, il cemento, materiali appropriati e acqua. Il cemento, che si presenta sotto forma di polvere finissima inorganica e non metallica, agisce generando un legame quando alla miscela è aggiunta l'acqua. La solidificazione consente l'unione tra i vari componenti.

Il costituente principale del cemento è il clinker, prodotto da calcare o argilla, finemente macinati, miscelati e scaldati fino ad una temperatura di circa 1450°C. In seguito, si aggiungono vari materiali come gesso, loppa, ceneri volanti, pozzolana naturale e calcare. Infine, si passa alla macinazione che produce una polvere sottile.

Queste fasi lavorative generano emissioni di CO_2 (900 kg di CO_2 per ogni

8 Rapporto mondiale sul cemento "The global cement report eleventh edition" 2016

tonnellata) a causa della combustione e della calcinazione[9]. Le emissioni di anidride carbonica nella fase di combustione dipendono, però, dal combustibile utilizzato, invece quelle dovute alla calcinazione sono generate dalla decomposizione del calcare.

Oltre al cemento, altri elementi importanti sono gli additivi perché essenziali per ottenere i requisiti progettuali. Anche se il loro dosaggio è in piccole quantità (si aggira tra lo 0,2 e il 2% in massa del contenuto di cemento), gli additivi sono in grado di determinare importanti effetti, e di variare il fabbisogno d'acqua. Inoltre modificano le proprietà del calcestruzzo come quelle reologiche (che definiscono la deformazione e la viscosità del materiale) e la capacità di essere pompato all'interno delle cavità progettate, ma anche le proprietà di presa allo stato plastico. Incidono anche sulle specifiche del calcestruzzo indurito, come ad esempio la resistenza meccanica, la resistenza ai cicli di gelo e disgelo e ai sali disgelanti, la resistenza ai solfati e altri parametri legati alla durabilità.

L'impiego degli additivi fornisce un beneficio dal punto di vista della sostenibilità. Infatti si ha un aumento della durata del ciclo di vita, che ovviamente porta ad un minor impatto ambientale perché le strutture non devono essere ripristinate in tempi troppo brevi, diminuendo anche gli interventi di manutenzione. Gli additivi permettono un migliore utilizzo di acqua e di altri componenti a forte impatto ambientale, con un considerevole risparmio di CO_2. Inoltre l'incremento di fluidità riduce l'energia richiesta durante la fase di impasto e di messa in opera.

Attualmente in Italia circa 80% degli additivi è di tipo superfluidificante,

9 Processo di riscaldamento ad alta temperatura che porta ad eliminare le sostanze volatili da una miscela solida.

che gioca un ruolo fondamentale dal punto di vista eco-sostenibile. L'additivo riduce il contenuto di acqua nella miscela, migliorandone le prestazioni, sia iniziali che di durabilità. Consente inoltre l'impiego di cementi a minor contenuto di clinker, emettendo minori quantità di CO_2.

Le tematiche globali, ormai note a tutti, come l'incremento demografico, il cambiamento climatico e l'inquinamento, richiedono sempre più strategie globali mirate alla conservazione e ad una gestione più consapevole delle risorse idriche.

Il fabbisogno di acqua per la produzione mondiale di calcestruzzo, in assenza di additivi, sarebbe di 2,3 miliardi di metri cubi annui. L'impiego su larga scala degli additivi consentirebbe un potenziale risparmio di circa 350 milioni di metri cubi di acqua.

Nella produzione del calcestruzzo, come detto prima, si verificano significative emissioni di CO_2, in particolare nella produzione del clinker. Il calcestruzzo è il materiale da costruzione più utilizzato al mondo per il suo relativo basso costo. Fortunatamente, il suo contenuto di ECO_2 (Embodied Carbon diOxide[10]) è pari a solo il 10% del peso proprio, che risulta essere venti volte inferiore a quello dell'acciaio.

Inoltre ci sono vari altri aspetti positivi dal punto di vista ambientale, ad esempio non è richiesto l'abbattimento di alberi, che possono quindi proseguire il loro assorbimento di CO_2 dall'atmosfera; infatti è importante ricordare che le piante sono un polmone verde in quanto emettono ossigeno e assorbono anidride carbonica.

Il calcestruzzo nel processo di carbonatazione assorbe inoltre CO_2,

10 Quantità di CO_2 consumata per estrarre, trasformare, trasportare, fabbricare e smaltire a fine vita un materiale o un prodotto, inclusi i costituenti di un edificio.

diminuendo così il proprio impatto sull'ECO_2. Come già accennato, l'impiego di cementi di miscela, grazie ad additivi, consente di ridurre ulteriormente del 10%, le emissioni dei gas serra derivati dal processo produttivo e consente il riutilizzo dei materiali di scarto provenienti da altre lavorazioni.

È importante anche sottolineare che la produzione ed il trasporto del calcestruzzo avvengono a distanze minime, quindi per il loro approvvigionamento non è necessario il consumo di molto carburante e la creazione di gas di scarico.

Ci sono diversi materiali che provengono da alcuni processi industriali che rappresentano prodotti di scarto come ceneri volanti, loppa d'alto forno e il fumo di silice, alcuni di questi materiali si ottengono anche nei processi di produzione dell'energia elettrica, e perfino alcune rocce di scarto dell'estrazione mineraria possono essere utilizzate come aggregati. Tutti questi possono sostituire una parte del cemento, ottenendo un doppio vantaggio nel loro reimpiego: da un lato si ha un risparmio economico, dall'altro un beneficio dal punto di vista ambientale perché si contribuisce alla riduzione dei rifiuti.

Oltre a questi vantaggi, la qualità finale del calcestruzzo è migliorata.

La cenere volante è una polvere sottile di tipo vetroso. Si ricava con un processo di filtrazione dei gas di combustione del carbone bruciato nelle centrali termoelettriche. Migliora alcune caratteristiche del calcestruzzo, riducendo lo sviluppo del calore di idratazione, e aumenta sia l'impermeabilità sia la resistenza alla carbonatazione.

La loppa granulata d'altoforno si ottiene invece dalla fusione in altoforno di minerali di ferro e dal raffreddamento rapido della scoria prodotta dal processo di fusione. Viene impiegata nei cementi di miscela; è adatta per

strutture di grande spessore perché riduce l'incremento della temperatura rispetto all'utilizzo del solo cemento.

Il fumo di silice si ottiene invece come scarto di produzione di silicio e di leghe ferro-silicio. Il processo industriale prevede la riduzione di quarzo puro con carbone, utilizzando forni ad arco elettrico, ed è costituito prevalentemente da biossido di silice amorfo. Il termine "fumo" è utilizzato per rendere l'idea della ridotta dimensione delle particelle ottenute (diametro medio di 0,1-0,2 μm contro i 20-40 μm del cemento). Le proprietà chimiche e fisiche lo rendono simile ad una pozzolana[11], ed il suo utilizzo nel calcestruzzo incrementa la resistenza meccanica, la durabilità e la resistenza all'umidità. Le attuali norme europee sul calcestruzzo (UNI EN 206-1) consentono, però, un limitato utilizzo delle aggiunte riciclate. Se le norme cambiassero e si potessero utilizzare maggiori quantità di queste, i vantaggi aumenterebbero. Si avrebbe una riduzione di energia e di materie prime utilizzate nella produzione del calcestruzzo, con una diminuzione di ECO_2. L'impiego di questi materiali è però legato all'uso di additivi, di cui sì è accennato in precedenza.

Il calcestruzzo può essere prodotto sostituendo parte degli aggregati naturali con prodotti di riciclo, ma anche utilizzando lo stesso calcestruzzo riciclato. In Italia la normativa impone però limiti stringenti al loro utilizzo, specialmente nelle strutture portanti, invece in altri Paesi si hanno ottime esperienze dove le percentuali sfiorano il 100%. Nel calcestruzzo possono essere utilizzati anche vetro e mattoni frantumati, anche se si ottengono bassi livelli di resistenza e durabilità; questo ultimo tipo di calcestruzzo è

11 Tipo di piroclastite costituita in prevalenza da pomici e da scorie vulcaniche, utilizzata nell'industria edile.

molto più adatto per un uso in ambienti non esposti ad aggressioni e per usi non strutturali.

2.2 I benefici ottenibili grazie all'utilizzo del calcestruzzo

È utile aver chiari gli aspetti sui quali il calcestruzzo potrebbe rappresentare una buona scelta come materiale di costruzione. L'elenco dei possibili benefici è ovviamente lungo, ma si potrebbe tentare una schematizzazione per renderlo facilmente comprensibile in tutta la sua evidenza:

- Il prolungato utilizzo del calcestruzzo nelle infrastrutture civili che, dal punto di vista delle applicazioni moderne, ha dimostrato che è il miglior materiale disponibile per queste applicazioni, in grado di fornire una bilanciata combinazione tra prezzo e prestazione.
- È facilmente reperibile localmente, adattabile alle condizioni climatiche locali e alle condizioni di esposizione.
- È un materiale versatile che può assumere diverse forme ed è disponibile in vari colori.
- Il tipo di resistenza del materiale e la sua porosità consentono di soddisfare egregiamente le richieste progettuali, per tutte le condizioni climatiche, anche per ridurre gli effetti dei terremoti, incendi, inondazioni ed esplosioni.
- Combinato con l'armatura in acciaio, acquisisce proprietà di resistenza a trazione e duttilità.
- La sua durata, e quindi la vita media di servizio della struttura in calcestruzzo, può essere prolungata attraverso l'applicazione di alcune misure.
- Ha un'elevata massa termica, quindi mantiene buone condizioni

climatiche all'interno degli edifici, riducendo in questo modo il consumo energetico all'interno degli stessi.

- La qualità del calcestruzzo può essere facilmente verificata, ed economicamente è un vantaggio per controllare i costi e i benefici del prodotto impiegato.
- Permette un drenaggio sostenibile dell'acqua piovana.
- Garantisce un buon isolamento acustico.
- Richiede una ridotta manutenzione rispetto ad altri materiali.
- È inorganico, non infiammabile e non marcisce; garantisce una buona resistenza al fuoco.
- Fornisce anche una buona protezione contro le emissioni radioattive prodotte dalla presenza di radon nel suolo.
- Nella produzione del cemento si può ridurre l'utilizzo di risorse non rinnovabili, come i combustibili e le materie prime; il clinker può essere facilmente realizzato con combustibili e materie prime alternativi. Come visto in precedenza, si possono anche usare materiali di riciclo come loppa, ceneri volanti, fumi di silice, calcare, ecc. È inoltre possibile l'utilizzo di calcestruzzo riciclato, proveniente dalle demolizioni, miscelato insieme agli aggregati naturali. In questo modo si possono produrre meno rifiuti.
- È un materiale con un elevato albedo (cioè con alta riflessione luminosa), quindi il suo utilizzo nelle pavimentazioni stradali e sui tetti contribuisce a ridurre il surriscaldamento urbano presente nelle grandi città. Permette così anche la riduzione dei consumi energetici e le emissioni di CO_2.
- Il calcestruzzo demolito è in grado di riassorbire considerevoli quantità di anidride carbonica. Questo avviene in seguito alla

demolizione, i resti frantumati ed esposti all'aria assorbono anidride carbonica. La superficie porosa a contatto con il CO_2 realizza spontaneamente la reazione di ri-carbonatazione. Possono essere riassorbite da 15 a 35 kg di CO_2 per ogni metro cubo di calcestruzzo in un arco temporale tra i 2 e i 3 anni.

2.3 Ciclo di vita e sostenibilità del Calcestruzzo

Le costruzioni edili in Italia sono responsabili di quasi la metà delle emissioni in carbonio, di circa la metà dei consumi di acqua, di un terzo dei rifiuti portati in discarica, di quasi un quarto di tutte le materie prime usate dal sistema economico. La scelta dei materiali utilizzati ha una rilevante importanza sulla funzionalità, sulla durabilità e sugli interventi di manutenzione. A fronte di queste premesse, il calcestruzzo potrebbe essere il materiale migliore dal punto di vista della sostenibilità, per i migliori consumi energetici associati al suo ciclo di produzione e durante l'intero ciclo di vita.

I campi progettuali di applicazione sono innumerevoli: linee ferroviarie, ponti, mega- strutture, strade, tunnel, ponti, aeroporti, strutture di protezione contro le inondazioni, sistemi di raccolta delle acque di scolo e molti altri. La fase di progettazione deve quindi prendere in considerazione i dettagli strutturali e la scelta dei materiali più idonei. Ma anche la valutazione dell'impatto che una struttura produce sull'ambiente, in ogni fase del suo ciclo vitale, dalla realizzazione alla sua demolizione, passando per l'estrazione dei materiali, la produzione, la costruzione, l'utilizzo, la manutenzione, e infine il riciclaggio. Il calcestruzzo, se ben progettato e correttamente messo in opera, supera egregiamente tutte queste fasi. Durante l'utilizzo si ha un'efficienza energetica migliore rispetto agli altri

principali materiali edili, con un risparmio energetico che si aggira tra il 5% e il 15%, questo compensa il valore di energia consumata per la costruzione e per l'installazione. Di solito circa l'80-90% dell'energia utilizzata durante il ciclo di vita di un edificio è consumata durante l'utilizzo. È in questa fase che è possibile ottenere il maggior risparmio di energia. Se i nuovi edifici e quelli vecchi ristrutturati seguissero standard progettuali idonei a prolungarne la vita utile, si potrebbero risparmiare fino a 30-45 milioni di tonnellate di CO_2 ogni anno. Nella fase di realizzo si ha un consumo energetico intorno al 10-20% dell'energia totale consumata dall'opera. Ovviamente le percentuali dipendono dalla durata media delle strutture. In ottica di sostenibilità si dovrebbero progettare opere con durata maggiore e con minimi interventi di manutenzione.

Nelle norme nazionali e internazionali vi sono diversi requisiti che definiscono la qualifica del materiale per il raggiungimento del requisito di durabilità (EN 206, UNI 11104, Linee guida sul calcestruzzo strutturale), ma il parametro che più influenza la durabilità è il rapporto a/c (acqua cemento).

Alcune caratteristiche del calcestruzzo migliorano con un basso rapporto a/c, cioè con un alto contenuto di cemento rispetto all'acqua, ad esempio le resistenze meccaniche, la resistenza agli attacchi chimici e l'aumento di impermeabilità. Per non andare contro ai principi di durabilità e sostenibilità (ECO_2), anziché aumentare l'apporto di cemento si opta per una diminuzione di acqua, grazie al contributo dell'additivo superfludificante. Grazie a questo, è possibile produrre conglomerati cementizi equivalenti o superiori ai corrispondenti calcestruzzi non additivati, con un risparmio di circa il 10-15% in termini di ECO_2. Inoltre, le loro caratteristiche risultano decisamente superiori in termini di lavorabilità, pompabilità, robustezza,

resistenze meccaniche, tendenza alla fessurazione, ecc.

Un calcestruzzo con meno pasta (cemento + acqua), a parità di rapporto a/c (acqua cemento) e con stesso grado di lavorabilità (cioè pari resistenza meccanica, e stessa facilità di messa in opera e costipazione[12]), è un calcestruzzo con durata maggiore. Infatti, quasi tutti i fenomeni di degrado coinvolgono la pasta di cemento e non il calcestruzzo nel suo insieme. Esaminando alcuni di questi fenomeni si può meglio comprendere come ottenere innumerevoli vantaggi.

Il primo fenomeno da esaminare è la carbonatazione. Alcuni materiali edili come cemento e calce, in presenza di anidride carbonica e idrossido di calcio, naturalmente presente in essi, formano carbonato di calcio. La carbonatazione crea le condizioni favorevoli all'innesco della corrosione delle eventuali barre di armatura inserite internamente. Riducendo il rapporto a/c si limita la carbonatazione.

Un altro processo è l'attacco solfatico, che consiste nella interazione tra lo ione solfato ed alcuni composti chimici presenti nella matrice cementizia (calce d'idrolisi, silicato di calcio idrato, alluminato di calcio idrato, etc). Il solfato può avere origine dall'ambiente esterno o essere già presente all'interno del calcestruzzo ad esempio come impurità. La reazione che ne consegue porta alla formazione di ettringite (sale trisolfo-alluminato di calcio idrato) e ad un aumento di volume, con il conseguente insorgere di tensioni di trazione che possono provocano danni severi e il minor rapporto a/c ne costituisce un miglioramento. Anche la fessurazione del calcestruzzo può essere limitata. Questa è un fenomeno dannoso e rappresenta il

12 Compattezza, omogeneità, maggiore è la densità migliore risulta la costipazione.

principale inconveniente ai fini della durabilità. Si manifesta con piccole fessure, visibili ed altre invisibili, dove le azioni esterne statiche e dinamiche producono sollecitazioni nella struttura in calcestruzzo durante il periodo di esercizio. Un ultimo fenomeno considerabile è lo spalling, cioè il distacco di parti del calcestruzzo, che si verifica ad alte temperature, ad esempio durante un incendio.

È evidente quindi che l'utilizzo di questi prodotti, che attualmente sono impiegati per economicità, dovrà essere sempre più esteso per produrre materiali cementizi da costruzione con maggior durata e quindi sempre più sostenibili.

Anche in questo caso gli additivi si rivelano determinanti massimizzando la resa di questa tipologia di calcestruzzi. Additivi aeranti, coadiuvanti della viscosità e del pompaggio, ma anche della ritenzione d'acqua, possono infatti agevolare la produzione e la messa in opera del calcestruzzo riciclato, mitigando le inevitabili variazioni nel suo processo di produzione.

Analizzando solo gli aspetti ambientali, l'impatto è sicuramente insostenibile, ma si devono considerare anche gli aspetti economici e sociali. Il calcestruzzo quindi è un materiale da costruzione versatile, che è in grado di migliorare la sostenibilità dell'intero ciclo di vita di un edificio e di un'infrastruttura, contribuendo così allo sviluppo di una società globale più sostenibile ed in grado di limitare i cambiamenti climatici.

2.4 Il Carbon Footprint di Prodotto (CFP)

Il calcolo della Carbon Footprint di Prodotto (CFP) comprende tutte le emissioni di gas ad effetto serra lungo tutto il ciclo di vita del prodotto, partendo dall'estrazione delle materie prime fino alla fase dello

smaltimento. Il calcolo della CFP viene ad oggi effettuato seguendo specifici requisiti tecnici normati[13].

Figura 2.4.1. Carbon Footprint da "www.improntaecologica.it

All'interno di un'impostazione di sostenibilità è utile fare una considerazione sulle impronte di carbone prodotte dal calcestruzzo.

Il processo produttivo è ad alto dispendio di energia, ed essendo di largo impiego per i suoi vantaggi economici, progettuali e tecnici, risulta il materiale con maggior immissione di CO_2 nell'atmosfera, almeno nella sua fase di realizzo. Tuttavia, per rispettare l'elevata richiesta di funzionalità, durabilità e vita di servizio, la CO_2, incorporata nei materiali da costruzione ed emessa durante la fase di costruzione, rappresenta una quantità molto piccola rispetto a quella associata all'utilizzo dell'infrastruttura. La footprint, cioè l'impronta dell'emissione di anidride carbonica in atmosfera, è in rapporto quattro a uno tra la durata di esercizio e la fase di realizzo. Ad esempio, se si considerasse la costruzione di un ponte in grado di ridurre un percorso stradale, sarebbe evidente che l'impatto ambientale per la

13 Specifica tecnica PAS 2050, emessa dall'ente di normazione inglese BSI, o lo standard emesso dal WRI/WBCSD. Nel 2013 è stata realizzata la pubblicazione del nuovo riferimento normativo univoco a livello internazionale: la specifica tecnica ISO/TS 14067.

realizzazione di un'infrastruttura in calcestruzzo diventerebbe trascurabile se venisse considerato anche quello del traffico legato all'utilizzo dell'infrastruttura stessa.

2.5 L'Embodied Energy

Nelle società preindustriali i materiali da costruzione erano tutti di origine naturale e non creavano inquinamento né durante la fase di costruzione né in quella di smaltimento, erano infatti facilmente riassorbibili nei cicli naturali dell'ambiente.

A seguito dell'introduzione di nuovi materiali e della loro produzione su larga scala, la creazione di inquinanti e di emissioni di anidride carbonica è aumentata in modo esponenziale. In particolare, le emissioni di CO_2 sono fortemente correlate all'energia consumata per produrre i materiali da costruzione e a quella impiegata nella fase di estrazione delle materie prime. Il trasporto e l'edificazione costituiscono un ulteriore dispendio di energie e quindi di emissione di carbonio. Dopo che l'edificio è terminato, il suo normale utilizzo comporta dispendi energetici, più o meno cospicui a seconda del progetto seguito e del luogo in cui è edificato. Questi consumi aumentano a seguito delle normali manutenzioni. Quando poi la struttura diventa inagibile, obsoleta o semplicemente si passa alla sua demolizione, si deve considerare un ulteriore massiccio dispendio energetico. Per ultimo, i materiali dovranno essere riciclati o trasformati.

Come si nota facilmente, il calcolo di tutta la CO_2, immessa in atmosfera, e dell'energia impiegata da parte di una singola struttura è maggiore di quello

che si potrebbe pensare.

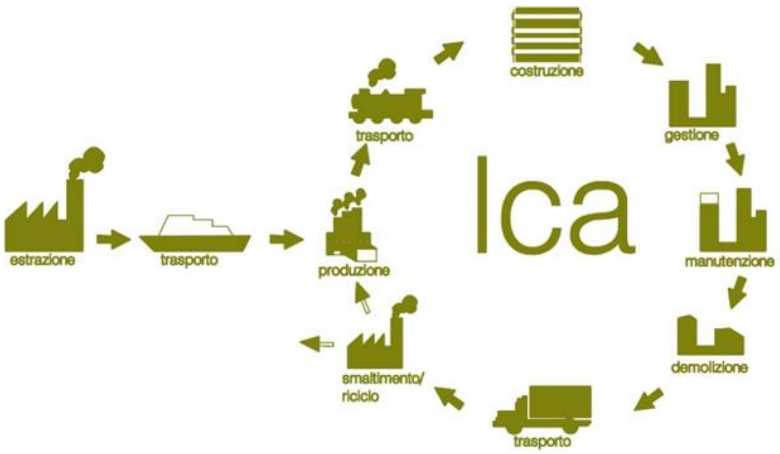


Figura 2.5.1. Life Cycle Embodied Energy da "www.campesato.it

Con il termine di Embodied Energy si vuole indicare quindi l'energia incorporata dal "prodotto" in tutto il suo ciclo vitale (Life Cycle Embodied Energy). Una normale unità abitativa media in Italia richiede per la sua costruzione circa 100 tonnellate di materiali, per la maggior parte realizzati con processi di cottura, con un costo energetico medio di 600 kCal/kg. Questa energia equivale al consumo di 5 tonnellate di petrolio, oltre ad un'altra mezza tonnellata per la movimentazione della terra, il trasporto e le operazioni di cantiere. Questi dati servono solo per inquadrare gli ordini di grandezza della Embodied Energy. L'impatto ambientale dei materiali usati in ambito edilizio, in particolare in termini di impronta di CO_2 e di Embodied Energy, può essere ridotto già a partire dallo stadio di progettazione.

Ogni soggetto può contribuire singolarmente all'ottimizzazione del progetto ma, solo attraverso un'azione coordinata e la cooperazione di tutti i soggetti coinvolti, si può veramente pensare di ottimizzare al massimo l'impatto della realizzazione di una struttura.

2.6 Nuove metodologie per produrre calcestruzzi sostenibili

Le nuove esigenze di mercato portano ad una crescente richiesta di materiali edili con prestazioni meccaniche sempre migliori, per supportare la progettazione di strutture imponenti e soddisfare progetti ambiziosi.

Nell'ambito del calcestruzzo, cresce la necessità di maggior resistenza a compressione e flessione, e di una più alta tenacità e durabilità, caratteristiche da soddisfare con l'aggiunta di nuovi materiali. Un esempio è l'utilizzo di materiali a base di carbonio come i nanotubi CNTs[14]. Tramite il loro inserimento, si ottengono prestazioni decisamente più elevate, anche se con un aumento dei costi.

Un altro fronte di sperimentazione è dato dalla valorizzazione di rifiuti alimentari che, tramite processi chimici "verdi" come quelli termochimici, possono aumentare le conversioni delle biomasse[15]. In particolare, l'attenzione è focalizzata sulla pirolisi, il trattamento termico della biomassa, e sull'uso del Bio-char, il suo sotto prodotto solido. Recentemente, infatti, la letteratura ha mostrato che esso potrebbe essere apprezzato come inerte verde in compositi a base cementizia, con l'obiettivo di rendere il processo produttivo dei materiali da costruzione tradizionali più sostenibile.

La pirolisi, o piroscissione, è un processo termico che prevede la decomposizione di materiali organici tramite l'applicazione di flussi di calore, in totale assenza di ossigeno. Se il riscaldamento fosse fatto con

14 Carbon Nano Tubes

15 La Direttiva Europea 2009/28/CE, definisce la biomassa come "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura, comprendente sostanze vegetali e animali, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.

l'ossigeno si verificherebbe la combustione, con la produzione di altro calore e di gas di scarico (anidride carbonica). Invece, in condizioni anossiche (totale assenza di ossigeno), il materiale subisce la scissione dei legami chimici e la suddivisione in molecole più corte e semplici. La pirolisi dei rifiuti utilizza temperature comprese tra 400 e 800°C. Si producono vari residui: uno carbonioso solido (*char*), un liquido nero viscoso (*tar* o *olio di pirolisi*) e una miscela gassosa composta sostanzialmente da CO e H_2 (*syngas*). Il residuo carbonioso solido ottenuto può venire ulteriormente raffinato fornendo prodotti come il carbone attivo.

In particolare, la pirolisi è un approccio promettente che può convertire rifiuti di biomassa in energia, sotto forma di bio-olio, syngas e il bio-char, che non è più visto come un prodotto di scarto. Infatti le sue micro particelle pirolizzate sono utili per migliorare le proprietà meccaniche dei materiali compositi a base cementizia. Il loro basso costo potrebbe contribuire alla produzione di materiali da costruzione più sostenibili, con una riduzione delle emissioni di CO_2. Inoltre, queste particelle sono rifiuti solidi di un processo che non riguarda la tecnologia del calcestruzzo, ma permette il recupero di energia da biomassa. I risultati ottenuti sono quindi promettenti anche dal punto di vista della sostenibilità ambientale.

2.7 Analisi eco-meccanica della sostenibilità dei calcestruzzi

Per valutare i vari tipi di materiali già in fase di progettazione, è necessario l'utilizzo di un metodo analitico che consenta una conoscenza a priori delle prestazioni, degli impatti ambientali, considerando capacità portante, durabilità e sostenibilità.

L'analisi degli aspetti ecologici, come la quantità di emissioni di CO_2 o la quantità di energia grigia, non è sufficiente, perché alcune soluzioni ecocompatibili non forniscono le giuste prestazioni strutturali, a causa della riduzione delle caratteristiche meccaniche. In fase progettuale occorre quindi valutare sia gli aspetti ambientali, sia le prestazioni meccaniche, come la resistenza e la duttilità.

L'analisi dei materiali da costruzione si effettuata con l'uso di due indici globali, uno di carattere meccanico, MI (Mechanical Index), e l'altro di carattere ecologico, EI (Ecological Index), rendendo possibile una valutazione eco-meccanica. L'indice meccanico, MI, tiene conto delle caratteristiche del materiale e di quelle strutturali, e può essere stimato dal prodotto tra mpm (parametro meccanico del calcestruzzo) e mps (parametro meccanico della struttura):

$$MI = mpm \cdot mps$$

Per una valutazione sperimentale e numerica dei parametri, i test di laboratorio devono riuscire ad emulare, in modo più accurato possibile, il comportamento che i materiali avrebbero nelle strutture in due condizioni precise: una che rappresenta lo stato limite di esercizio e l'altra che valuta lo stato limite ultimo.

Nell' indice ecologico, EI, si considerano tre importanti parametri ambientali: l'anidride carbonica emessa (carbon footprint), l'energia grigia (Embodied Energy) e il volume di acqua impiegato per la produzione di un metro cubo di calcestruzzo attraverso la seguente formula che moltiplica i tre "consumi pesati":

$$EI=(\psi \cdot wc\psi)\cdot(\delta \cdot wc\delta)\cdot(\gamma \cdot wc\gamma)$$

dove ψ = quantità di CO_2; δ = quantità di Embodied Energy; e γ = volume d'acqua. I coefficienti di ponderazione wcψ, wcδ, wcγ valutano le condizioni di approvvigionamento idrico, del trasporto e del reperimento delle materie prime.

L'analisi eco-meccanica può essere impostata sull'uso di due metodologie differenti.
La prima metodologia si basa sul calcolo di un nuovo indice EMI (Eco-Mechanical Index) ottenuto dal rapporto tra gli indici globali, meccanico MI ed ecologico EI:

$$\text{EMI} = MI/EI$$

Dove questo rappresenta una valutazione di benefici strutturali e costi ambientali. Più alto sarà il rapporto migliore sarà il calcestruzzo impiegato. L'altro metodo ricorre ad una definizione di indicatori di riferimento (o benchmarks), relativi ai valori limiti, superiori e inferiori, che possono assumere MI ed EI. Ovviamente per l'indice meccanico è da impostare un riferimento minimo (MI_{inf}), cioè la struttura non potrà avere un valore al di sotto di questo. Invece, per quello ambientale, è da ricercare il valore massimo ammissibile oltre al quale il costo ambientale diviene eccessivo (EI_{sup}).
Si costruisce così un grafico, che avrà sugli assi cartesiani i rapporti tra i valori trovati degli indici ed i rispettivi valori limiti: EI_{sup} / EI sull'asse delle y e MI / MI_{inf} sull'asse x. Questi rapporti forniranno un numero maggiore o

minore di uno. Per quello ecologico, un valore inferiore all'unità significa un costo ecologico più alto di quello massimo ammissibile, quindi rappresenta una valutazione negativa del calcestruzzo. Per il rapporto meccanico, invece, con un valore superiore ad uno si ha una prestazione meccanica più alta della minima richiesta per quel particolare utilizzo progettuale. Complessivamente, un buon calcestruzzo dovrebbe avere contemporaneamente soddisfatte le due condizioni:

$$EI_{sup} / EI \quad > 1$$

$$MI / MI_{inf} \quad > 1$$

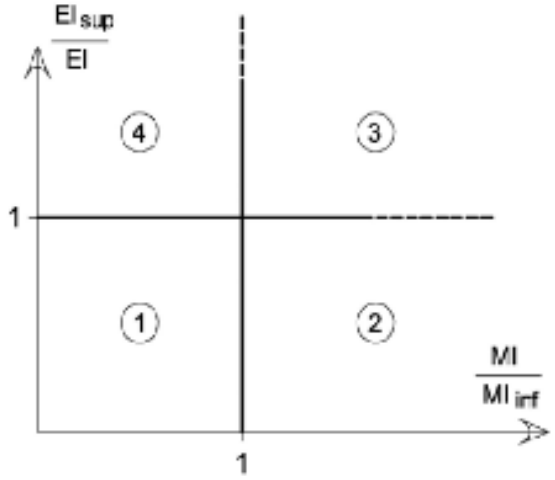


Figura 2.7.1. Diagramma delle caratteristiche eco-meccaniche

Con questa metodologia numerica, si può identificare un buon materiale se rientra nella zona 3 (Figura 2.7.1).

Solo a seguito di questa individuazione, si potrà passare al vaglio i vari prodotti presenti sul mercato e scegliere il più vantaggioso in termini economici.

3. IL CEMENTO

3.1 Dalla calce al cemento Portland

Il cemento ha origini molto antiche. Ancor prima dei romani alcuni popoli osco-italici[16] utilizzavano la pozzolana biancastra nell'edificazione delle loro mura. Ma furono i Romani ad usare in larga scala la pozzolana come legante per le fondazioni e i muri di grande spessore. Vitruvio nel *II libro del De Architectura* scrive: "*la pozzolana di Baia e di Cuma fa gagliarda non solo ogni specie di costruzione ma in particolare quelle che si fanno in mare sott'acqua*".

La pozzolana è costituita da calce mescolata con polvere vulcanica, prende il nome[17] dalla città di Pozzuoli, vicino Napoli. La polvere vulcanica è ottenuta dalla frantumazione di una roccia morbida, un tufo costituito prevalentemente da silice e allumina. La polvere, così ottenuta, reagisce con la calce aerea[18] e l'acqua, rivelandosi un ottimo sostituto della sabbia. I costruttori Romani impastarono la pozzolana con calce e l'acqua, formando malte idrauliche, che indurivano in assenza d'aria, e presentavano elevate resistenze meccaniche. Realizzarono, in questo modo, acquedotti, ponti, opere marittime e architetture importanti arrivate integre sino ad oggi.

Dopo il crollo dell'Impero Romano d'Occidente, la qualità delle costruzioni peggiorò notevolmente. Per tutto il Medioevo venne abbandonato l'uso

16 Insieme di popoli indoeuropei abitanti dell'Italia centrale e appenninica, caratterizzati da lingue tra loro imparentate: come le lingue osco umbre o italiche.

17 Pulvis Puteolana

18 Viene ottenuta per cottura di calcari puri, e rocce ad alto contenuto di carbonati di calcio. Indurisce a seguito dell'assorbimento dell'anidride carbonica presente dall'aria.

della pozzolana vulcanica e del cocciopesto[19]. Nel Rinascimento le tecniche costruttive migliorarono sensibilmente e architetti come Leon Battista Alberti e Andrea Palladio si rifecero a Vitruvio ed al modo di costruire dei Romani. Nel 1570 Palladio descrive nel Trattato di Architettura una calce (calce nigra), ottenuta per cottura di una pietra calcarea estratta nella zona vicino alla città di Padova, contenente impurità argillose e con caratteristiche idrauliche.

Solo nel 1756, l'ingegnere John Smeaton scoprì che i leganti migliori erano ottenuti da pietre calcaree contenenti consistenti quantitativi di materia argillosa. Le proprietà della calce idraulica venivano, quindi, messe in relazione con la tipologia della materia prima impiegata.

Nel 1796 l'ecclesiastico James Parker realizzò uno dei primi cementi idraulici, tramite la cottura a bassa temperatura nei forni da calce di concrezioni marnose[20] contenute nelle argille del fiume Tamigi. La caratteristica di questo materiale fu di avere una presa molto rapida. Il nome scelto per questo prodotto fu Cemento Romano, perché ricordava i cementi di calce e pozzolana ampiamente usati in epoca Romana.

Nell' 800, il progresso scientifico permise di scoprire le proprietà di calce, silicati e alluminati. La chimica stava facendo passi da gigante, e diversi scienziati francesi e britannici iniziarono a variare la percentuale del contenuto di argilla (da 10% fino a 40%) e di calcare, al fine di ottenere così nuovi cementi.

Nel 1811 James Frost propose un cemento composto da due terzi del peso

19 Materiale usato come rivestimento nei pavimenti o nelle cisterne per rendere impermeabile la superficie. Composto da frammenti di laterizi come tegole o mattoni aggiunti alla malta.

20 Roccia sedimentaria di tipo terrigeno, composta da una parte carbonatica.

di gesso ed un terzo d'argilla, il prodotto venne chiamato Cemento Frost. Sempre lo stesso inventore, nel 1822, scoprì alcuni calcari con piccole parti di allumina e ossido di ferro, ma con grandi percentuali di silice in grani molto fini. Da questi calcari silicei naturali si ottenne una calce bianca, idraulica, con ottime caratteristiche, che prese il nome di cemento inglese.
Nel 1818 il francese L.J. Vicat inizia la sperimentazione scientifica sulle calci idrauliche e stabilisce quali fattori governano le proprietà idrauliche osservando che la calce idraulica possiede sia silice sia allumina, legate insieme da materiali argillosi. Questi studi portarono ad una calce idraulica artificiale, grazie ad un processo di calcinazione tra i 500 e i 1200°C di una miscela di calcari e di argille macinate. Da questi studi scaturirono alcuni brevetti che consentirono una vasta commercializzazione di prodotti: uno di questi prodotti della Vicat fu il Cemento Naturale Prompt, un legante idraulico naturale ottenuto tramite la cottura lenta e a bassa temperatura di calcari argillosi macinati. Il cemento naturale fu impiegato come aggiunta alla calce, poi come legante puro per realizzare elementi a stampo (analogamente allo stucco) e, infine, per fabbricare finte pietre.
Tra gli anni 1830 e 1910 l'edilizia ha vissuto un periodo di transizione, si è andati dalle costruzioni classiche, in pietra, fino alla tecnica del calcestruzzo armato. Inoltre, alcune regioni alpine della Francia hanno visto un fiorire di cementifici. In particolare, la zona dell'Isère e di Grenoble sono luoghi importanti per la quantità e la qualità di questo prodotto. E tuttora i cementifici producono questo tipo di cemento sia per opere di restauro sia per la realizzazione di nuovi prodotti e per una nuova architettura.
Il cemento è il composto che permette di realizzare il calcestruzzo, ottenuto mescolando con acqua, il cemento e gli aggregati. Questa pasta fa presa e indurisce a seguito di reazioni chimiche e all'idratazione.

I cementi sono oggi i leganti idraulici più diffusi in tutto il mondo. E tra questi il più importante è il tipo Portland, realizzato tramite cottura a 1300°C di calce e argilla. Questo composto costituì un importante punto di arrivo nei processi produttivi e sperimentali, e fu conseguito dall'inglese Joseph Aspdin nel 1824. Egli brevettò il prodotto denominandolo "cemento Portland". Il nome fu scelto perché il composto, una volta indurito, assumeva un aspetto che ricordava una pietra da costruzione, usata in Inghilterra in quel periodo, ricavata dall'isola di Portland. Nel brevetto di Aspdin, però, non venne evidenziata la rilevanza della temperatura di cottura della calce e dell'argilla. Infatti oltre i 900°C la calce viene combinata totalmente in silicati e alluminati di calcio. Lo studio scientifico del cemento Portland fu intrapreso in modo preciso nel 1845 da J.C. Johnson. Tramite una puntuale attività sperimentale, studiò il rapporto tra il calcare e l'argilla e la temperatura di cottura. Lo scopo fu di trovare la giusta composizione delle materie prime al fine di ottenere le migliori caratteristiche meccaniche del cemento. I risultati di queste ricerche sono alla base dalla moderna tecnologia di fabbricazione dei cementi tipo Portland. Il cemento Portland e la calce idraulica seguono processi produttivi simili. Però, la principale differenza si evidenzia nella fase di spegnimento: per la calce idraulica è indispensabile tramite l'aggiunta di acqua e consente la conversione dell'ossido di calcio libero in idrossido di calcio; per il cemento Portland invece non è necessaria, in quanto nel clinker non vi è presenza di calce libera, a parte piccoli residui. Una seconda differenza è la presenza del gesso, aggiunto al clinker per regolare e rallentare la presa e migliorare così la messa in opera del cemento Portland.

3.2 Ciclo produttivo del cemento Portland

Il cemento Portland segue varie fasi di produzione: estrazione, frantumazione, cottura, aggiunta del gesso, macinazione, imballo.
La prima è l'estrazione delle materie prime naturali come rocce argillose o calcaree, oppure dal reperimento di prodotti artificiali, come la cenere di pirite. In entrambi i casi si tratta di materiali ricchi di carbonato di calcio, di silicato di alluminio e di ferro.

La fase successiva è la frantumazione di questi materiali per ottenere un prodotto omogeneo che, alla fine di altri processi lavorativi, si presenterà come una farina.

Figura 3.2.1. Clinker

A questo punto, verrà sottoposto alla cottura ad alte temperature, circa 1450°C, col risultato di formare grossi granuli, detti “clinker” (Figura 3.2.1).
Nel forno il clinker subisce una serie di trasformazioni chimiche.
La prima è l'espulsione dell'acqua presente nelle materie prime, che si verifica già a 100°C. Successivamente, intorno ai 750°C, si ha la perdita

dell'acqua legata nelle argille, secondo la seguente reazione:

$$Al2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2 + 2H_2O$$

Da questa temperatura fino ai 1000°C si realizza la decarbonatazione del calcare, secondo la seguente reazione:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$
$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$$

Ma si verifica anche la reazione tra prodotti di decomposizione del carbonato di calcio e dell'argilla:

$$2CaO + SiO_2 \rightarrow SiO_2 + CaO \cdot SiO_2$$
$$CaO + AlO_3 \rightarrow CaO \cdot Al_2O_3$$
$$2CaO + Fe_2O_3 \rightarrow 2CaO \cdot Fe_2O_3$$

Tra i 1000°C e i 1200°C si formano il silicato bicalcico C_2S[21] e l'alluminato tricalcico C_2A:

$$2CaO + CaO \cdot Al_2O_3 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \qquad (3C_3A)$$
$$2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2 \qquad (2C_2S)$$

A seguire, tra i 1250°C e i 1450°C, inizia la formazione di fase liquida

21 Con la seguente simbologia chimica ridotta: $CaO = C$, $Al_2O_3 = A$, $Fe_2O_3 = F$, $SiO_2 = S$

(costituita dalla fusione dei componenti C_3A e C_4AF) e la produzione di silicato tricalcico C_3S:

$$CaO + 2CaO\cdot SiO_2 \rightarrow 3CaO\cdot SiO_2 \qquad (3C_3S)$$

In seguito, raggiungendo le temperature massime, si ha la parziale fusione della massa a 1450°C e la completa formazione dei silicati. Raggiunto il picco di temperatura, inizia il raffreddamento, ottenuto mediante una corrente d'aria. E a 1350° C si ottiene la composizione degli alluminati:

$$3CaO\cdot Al_2O_3 + (CaO)_4\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3 \rightarrow 3CaO\cdot Al_2O_3 + 4CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3$$

Alla fine del processo di cottura, il clinker è in forma di grumi di diametro variabile, dai 3 millimetri a 2,5 centimetri. La miscela viene, quindi, raffreddata rapidamente e finemente macinata in particolari "mulini a sfera" (di forma cilindrica), con aggiunta di gesso in opportune quantità, al fine di regolare l'esatto livello di presa desiderato. Si ottiene una polvere di dimensioni inferiori a 100 micrometri. Il prodotto realizzato è pronto per l'imballo.

In Figura 3.2.2 le fasi produttive:

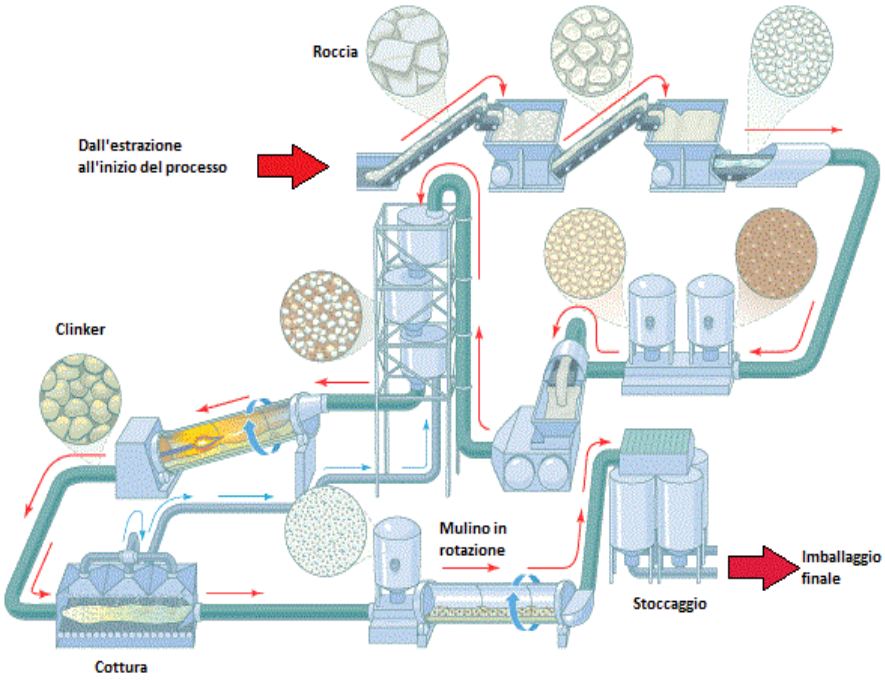


Figura 3.2.2. Le fasi produttive del clinker

Le caratteristiche fondamentali dei vari cementi, sono strettamente legate agli elementi interni al clinker. I principali composti che si possono trovare sono: il silicato tricalcico (C_3S), il silicato bicalcico (C_2S), l'alluminato tricalcico (C_3A), l'alluminato ferrito tetracalcico (C_4AF), i silicati e gli alluminati. Oltre a questi, si distinguono anche altri composti chimici, in minor quantità, come la calce sinterizzata (CaO), l'ossido di magnesio (MgO), gli ossidi alcalini, i fosfati, i fluoruri.

Il silicato tricalcico (C_3S), che è il composto più importante, reagisce rapidamente con l'acqua, in questo modo gli impasti avranno elevate prestazioni meccaniche una volta induriti ma è necessario portare la temperatura del forno tra i 1350 e i 1500°C; se la cottura avviene a

temperature più basse si ottiene il silicato bicalcico (C_2S, detta anche belite) e l'ossido di calcio (CaO o calce sintetizzata) con proprietà leganti più scarse.

La lenta idratazione del silicato bicalcico (C_2S), che si presenta in forma cristallina, permette di fornire buone resistenze meccaniche al prodotto, specialmente quando la polvere di cemento non deve passare immediatamente dalla produzione all'impiego in sede di cantiere. Quindi, prolunga la "data di scadenza" del prodotto e, in sede di cantiere, consente l'impiego in tempi più comodi, senza incorrere nel rischio di vedere il prodotto indurirsi troppo velocemente. Invece, un altro composto con una maggior velocità di idratazione è l'alluminato tricalcico (C_3A). Anche questo concorre a garantire una buona resistenza meccanica ma, se il prodotto finito non viene impiegato nel giro di poco tempo dalla sua realizzazione, rischia di ridurne le prestazioni a causa proprio della rapidità di assorbimento dell'acqua. È quindi preferibile il silicato bicalcico a questo alluminato ma, per questo obiettivo, si dovrebbero avere temperature molto più alte nella fase di cottura e quindi, dal punto di vista economico, non risulta conveniente. In compenso, si sfrutta una delle sue qualità positive che è legata ad una marcata capacità fondente.

Come l'alluminato tricalcico anche quello ferrito tetracalcico (C_4AF) tende ad idratarsi velocemente contribuendo alle caratteristiche meccaniche, anche se in modo minore, ed alla funzione di fondente. Gli alluminati costituiscono dal 15% al 25% della massa totale, a loro è anche dovuta la presa del cemento.

La grande quantità di massa finale contenuta nella polvere di cemento è però costituita da vari silicati. Essi rappresentano addirittura il 75-85% del totale e determinano le proprietà meccaniche del cemento a seguito

dell'idratazione e dell'indurimento. Proprio la velocità d'idratazione determina le resistenze meccaniche finali.
Altri composti minori si trovano alla fine del processo lavorativo del clinker e non tutti sono composti desiderabili. Ad esempio una parte dell'ossido di calcio si lega nella calce sintetizzata (CaO) e, se risulta superiore all'1%, può creare rigonfiamenti e fessure. Un'altra impurità è l'ossido di magnesio ed è preferibile che non superi il 2%. Questi ossidi alcalini hanno la spiccata capacità di reagire con alcuni aggregati, come i fosfati e i fluoruri, combinandosi e formando grossi grani durante la cottura. Questo non solo rallenta l'idratazione e accresce il volume, ma aumenta la probabilità di una disgregazione del prodotto finale.

3.3 Classi di cemento

Le tipologie dei vari cementi possono rispecchiare le applicazioni in sede di realizzo. Ma è indubbio che il loro largo impiego nelle costruzioni moderne impone un controllo normativo oltre che tecnico-commerciale.
Nella definizione delle caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche sono indispensabili i valori limite che esse possono avere. Le norme devono quindi intervenire nella formulazione di questi parametri.
In Italia le "*Norme Tecniche per le Costruzioni"* (NTC)[22], costituiscono la raccolta normativa vigenti sulle costruzioni in calcestruzzo armato. Raccolgono in un unico testo le norme che prima erano già state emanate da diversi decreti ministeriali. Definiscono non solo i principi per realizzare il progetto, ma anche la corretta esecuzione ed infine come effettuare il collaudo delle costruzioni. Forniscono anche i requisiti minimi di resistenza

22 Definite nel decreto ministeriale del 14 gennaio 2008

meccanica e di stabilità. Trattano di normativa antincendio con i relativi parametri di sicurezza. E definiscono i vincoli affinché l'opera possa durane il tempo necessario.

Oltre al testo precedente, vi sono altre normative emanate precedentemente, che classificano vari tipi di cementi. La norma europea UNI EN 197, in vigore dal 1993, cataloga i cementi in 5 tipi principali, in modo da fornire una panoramica unificata, basata sulle composizioni interne ai cementi stessi:

- CEM I, cemento Portland con non meno del 95% di clinker, la parte restante formata da elementi secondari. In esso gli additivi devono restare sotto all'1%.
- CEM II, cemento Portland di miscela (con 17 sottotipi) il clinker deve costituirne almeno il 65%. Nei sottotipi varia la percentuale dei costituenti.
- CEM III, cemento d'altoforno, con 3 sottotipi, in questi il clinker è in quantità decisamente più bassa, ma superiore al 5%. Cambiano però i livelli dei vari componenti come la loppa d'altoforno. I sottotipi si differenziano in base alla sua percentuale: sottotipo A con la loppa al 36-65%; sottotipo B con la loppa al 66-80%, ed infine sottotipo C con la loppa al 81-95%.
- CEM IV, cemento pozzolanico, con due sottotipi. Nel primo (A) il contenuto di clinker è tra il 65 e 89%. Nel sottotipo B, invece, varia tra il 45% e il 64%. Una miscela di microsilice, di cenere silicica e pozzolona naturale o industriale, costituisce il minerale come costituente secondario, presente fino al 5%.
- CEM V, cemento composito con 2 sottotipi. Il contenuto di clinker nel primo sottotipo è tra il 40% e il 64%, nel secondo è minore, tra

il 20% e il 39%. Inoltre sono presenti, in miscela, la loppa, la pozzolona, e la cenere silicica, come costituenti minerali. Il loro tenore deve essere però inferiore al 5%.

Un'altra normativa europea è la UNI EN 197/1, che permette di suddividere i cementi in altre sei classi, legate ai livelli di resistenza meccanica a compressione: 35.5 N, 32.5 R, 42.5 N, 42.5 R, 52.5 N, 52.5 R. Dove il numero è inteso in Newton (unità di misura della Forza, nel Sistema internazionale) su millimetro quadro, cioè forza su superficie, ovvero pressione. I valori rappresentano le soglie minime per rientrare nella classe. Le prove sono eseguite in laboratorio dopo 28 giorni dalla creazione del calcestruzzo, in modo da avere un riferimento identico per tutti, ma anche un buon livello di idratazione.

Le lettere N o R rappresentano invece il comportamento meccanico del cemento alle brevi stagionature.

Per determinare la resistenza meccanica del provino di cemento si segue una metodologia standardizzata, in modo da non modificare alcune variabili di paragone. In particolare, nelle varie prove dovrà essere mantenuto costante il rapporto tra acqua e cemento, perché se fosse variato si condizionerebbero marcatamente le prestazioni meccaniche. Nell'impasto si adotta quindi un rapporto di uno a due (una parte di acqua su ogni due di cemento).

Altri parametri da considerare sono il tipo di sabbia impiegata, e la sua granulometria, ma soprattutto il rapporto tra cemento e sabbia, da mantenersi costante per tutti i vari provini. I risultati ottenuti sono confrontati con quelli presenti dalla normativa, in questo modo si potranno catalogare nell'apposita classe di appartenenza.

Tipi Principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)		Composizione (percentuale in massa)[1]													Costituenti secondari
			Costituenti principali													
			Clinker	Loppa di altoforno	Fumi di silice	Pozzolana naturale	Pozzolana naturale calcinata	Cenere volante silicea	Cenere volante calcica	Scisto calcinato	Calcare					
			K	S	D[3]	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-				0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-				0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-				0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-				0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-				0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-				0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-				0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-				0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-				0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-				0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-				0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-				0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-				0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-				0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-				0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-				0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20				0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35				0-5
	Cemento Portland composito[4]	CEM II/A-M	80-94	6-20												0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35												0-5
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-				0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-				0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-				0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico[5]	CEM IV/A	65-89	-	11-35											0-5
		CEM IV/B	45-64	-	36-55											0-5
CEM V	Cemento composito[4]	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-		-	-	-				0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	31-49		-		-	-	-				0-5

Figura 3.3.1. Tipologie cementi da normativa UNI EN 197

Classe	Resistenza a compressione (N/mm^2)				Tempo di inizio presa (min)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata		
	2 gg	7 gg	28 gg		
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 60
32,5 R	≥ 10	-			
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20	-			
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5		≥ 45
52,5 R	≥ 30	-			

Figura 3.3.2 Classi di resistenza in basa alla normativa UNI EN 197/1

3.4 Dal cemento al calcestruzzo

I componenti del Clinker definiscono molte delle caratteristiche finali del cemento. Ma il passaggio dal cemento in polvere al calcestruzzo risiede nella fase dell'idratazione che, a tutti gli effetti, è una reazione chimica. Infatti, con l'aggiunta dell'acqua il cemento si trasforma e, da massa plastica, diventa un materiale rigido e meccanicamente resistente. La reazione non è immediata e, durante questo processo, si presentano due trasformazioni contemporanee. La prima è la presa, ovvero la perdita di lavorabilità del calcestruzzo, che inizialmente è una pasta facilmente duttile ed inseribile in cavità costruttive. Con il passare del tempo sarà sempre meno modellabile. La seconda è ovviamente l'indurimento che, non solo lega e blocca i vari elementi, ma fornirà la resistenza meccanica alla costruzione finale.

Le reazioni di idratazione per gli alluminati è la seguente:

$$2C_3A + 21H \rightarrow C_4AH_{13} + C_2AH_8$$
$$C_4AH_{13} + C_2AH_8 \rightarrow 2C_3AH_6 + 9/2H_2$$

mentre per i silicati si hanno queste reazioni di idratazione:

$$2C_3S + 6H_2 \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$$
$$2C_2S + 4H_2 \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$$

Ma i singoli composti presentano diverse velocità nella fase di idratazione. E, soltanto se ben amalgamati nel clinker, la velocità complessiva assumerà un valore medio.

È importante considerare l'estrema lentezza del processo. Anche se in apparenza dopo pochi giorni il calcestruzzo appare solido, esaminando in dettaglio ogni granulo del clinker, si nota che dopo quasi un mese la penetrazione dell'idratazione non supera i 4 micron di profondità dalla superficie. E raddoppia addirittura solo dopo un anno. Quindi, solo i granuli molto piccoli ottenuti dalla macina nei mulini permettono in un mese la completa reazione. Ovviamente la velocità di idratazione non è un parametro costante, ma dipende dal rapporto acqua / cemento e dalla temperatura a cui avviene.

Nel seguente grafico (Figura 3.4.1) sono mostrati i principali composti alluminati e silicati e la loro velocità di idratazione:

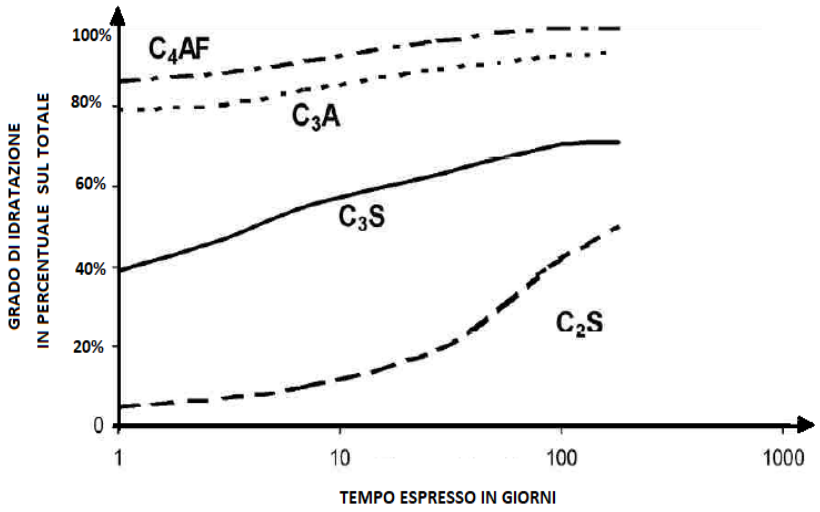


Figura 3.4.1. Velocità di idratazione dei vari composti

Dal grafico precedente si nota, come detto in precedenza, che gli alluminati reagiscono molto più rapidamente con l'acqua. Ma la velocità eccessiva potrebbe essere un problema nel cantiere, perché non darebbe il giusto tempo per posizionare l'impasto nel punto desiderato. L'aggiunta di gesso scongiura questo rischio e rallenta in modo appropriato la velocità del processo. Il gesso, modifica anche la presa ed il prodotto della reazione. Chimicamente, determina la formazione dell'ettringite, responsabile proprio del rallentamento dell'idratazione degli alluminati. Ma un eccesso potrebbe causare la formazione di fessure, perché la formazione dell'ettringite produce un'espansione, per questo è opportuno non superare il 5% della massa complessiva. Il ruolo dei silicati è principalmente quello di fornire la resistenza meccanica nel tempo, ma anche quello di proteggere dal degrado eventuali armature in ferro. Nell'immagine seguente (Figura 3.4.2) sono mostrati tre disegni che rappresentano come apparirebbero i

micro-granuli di silicati tricalcico o bicalcico durante la fase dell'idratazione. Nei tre stadi del processo si nota che, dopo il mescolamento, la reazione non ha modificato la struttura e il composto è ancora relativamente fluido (A). Solo con l'inizio della presa, i granuli iniziano a toccarsi perché diminuisce la plasticità iniziale (B). L'indurimento è infine dovuto all'intrecciarsi tra loro delle strutture (C).
L'idratazione dei silicati forma l'idrossido di calcio $Ca(OH)_2$ o portlandite. Anche se non possiede una rilevante resistenza meccanica ha un pH basico che conferisce l'importante caratteristica di protezione dalla corrosione delle armature in ferro, presenti all'interno del calcestruzzo.

3.5 Il calcestruzzo

Il calcestruzzo è un materiale di largo utilizzo, perché economico e con materie prime facilmente reperibili, ma anche per la sua facilità e versatilità di utilizzo. La differenza di qualità è data in gran parte dalla proporzione degli ingredienti.

Figura 3.5.2. Fase idratazione silicati tricalcico e bicalcico

Cemento, acqua, sabbia e aggregati lapidei dovranno opportunamente essere dosati. Ad esempio, con l'aumento della pasta cementizia aumentano la coesione e la plasticità dell'impasto e quindi migliora la lavorabilità, ma

peggiora la qualità delle prestazioni della struttura. Infatti, la fase di idratazione causerà un aumento di calore, che tenderà maggiormente a fessurare la struttura. Se invece aumenta la percentuale degli aggregati lapidei il calore viene diffuso su di una massa maggiore, con minore incidenza della fessurazione.

La lavorabilità del calcestruzzo è inoltre agevolata dalla sua consistenza nella fase semiliquida. Quindi, aumentando il rapporto acqua/cemento la pasta sarà più duttile, ma successivamente peggioreranno le prestazioni del calcestruzzo indurito, con anche un aumento di porosità. Infatti, potrebbe verificarsi un'eccessiva segregazione dei diversi componenti costituenti la miscela (acqua, cemento e aggregati, ecc.). Questa separazione è causata dalle differenti dimensioni e pesi specifici delle varie particelle. La segregazione avviene più facilmente negli impasti fluidi, provocando una notevole presenza di vuoti localizzati all'interno struttura.

La riduzione del quantitativo di sabbia rispetto all'aggregato lapideo, invece, rende il prodotto meno coesivo, con il rischio dell'insorgere del fenomeno del bleeding[23].

Tutti questi problemi impongono, in fase di realizzo in cantiere, di dosare i componenti in modo preciso.

Imprese poco corrette, per risparmiare sui costi, potrebbero realizzare strutture con un'eccessiva presenza di sabbia, rendendo il prodotto strutturalmente meno performante. Ovviamente le normative lo vietano e servono anche a questo scopo.

---

23 essudazione (in italiano), cioè la risalita in superficie del conglomerato cementizio di una parte dell'acqua dell'impasto durante la fase di indurimento del calcestruzzo. Si può quindi formare uno strato d'acqua e cemento, denominato boiacca.

3.6 I costituenti del calcestruzzo e normative

Nell'altoforno i vari elementi, ovvero cemento, acqua, aggregati e additivi, vengono dosati nella centrale di betonaggio. Il tutto viene poi miscelato per conferire uniformità al composto. In sede di cantiere si aggiunge l'acqua nella betoniera per far iniziare la fase di idratazione. L'acqua deve però essere pura, priva di sostanze che, reagendo chimicamente, potrebbero degradare le strutture. I contaminanti organici sono i più diffusi, specialmente se l'acqua proviene da falde contaminate, ma anche la presenza di acidi potrebbe creare problemi all'impasto. L'indicatore di acidità fornisce un primo modo, facile e pratico, per capire se l'acqua va bene per l'impasto, ma non è sufficiente. Generalmente, si tende ad usare un rapporto acqua/cemento di 0.5, cioè 50 litri su 100 Kg di cemento. Per identificare la quantità più opportuna si fa ricorso alla regola di Lyse. Formulata dal norvegese Inge Martin Lyse nel lontano 1932, tale legge esprime empiricamente l'importanza del tenore di acqua sulla lavorabilità. Considera, però, anche l'acqua contenuta eventualmente dagli agglomerati, ed afferma che la lavorabilità di un impasto dipende dal suo contenuto, ma non dal rapporto acqua su cemento.

Per un dato diametro dell'aggregato, sostiene che maggiore sarà la classe di consistenza richiesta per il calcestruzzo fresco più acqua dovrà essere aggiunta all'impasto. Se invece fosse fissata la classe di consistenza del calcestruzzo, più crescerà il diametro massimo dell'aggregato minore sarà la richiesta d'acqua.

Dopo il mescolamento, il calcestruzzo fresco dovrà essere posizionato, e il suo grado di lavorabilità (o di costipazione) definirà il tipo di impasto. Saranno quindi importanti il rapporto acqua/cemento, il rapporto aggregato/cemento e l'eventuale presenza di superfluidifcanti. Per definire le classi di consistenza, si può ricorrere a vari test.

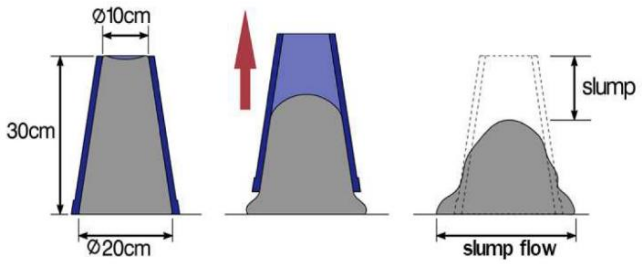


Figura 3.6.1. Slump test

Il più usato è lo slump test, realizzato tramite il cono di Abrams (Figura 3.6.1). Lo scopo è determinare la consistenza del calcestruzzo fresco. Un recipiente in acciaio, a forma di tronco di cono, alto 30 cm, viene riempito con l'impasto appena realizzato. Lo stampo poi sarà sollevato e l'abbassamento del calcestruzzo (o slump) fornirà una misura della sua consistenza.

La norma UNI EN 206-1 definisce 5 classi di consistenza in base proprio a questo test (Figura 3.6.2). La lavorabilità del calcestruzzo fresco fornisce quindi il tipo di applicazione del medesimo.

Anche per gli aggregati ci sono precise normative e diversi criteri di utilizzo in base al tipo e alla quantità.

Essi costituiscono lo scheletro rigido del conglomerato e forniscono gran parte delle caratteristiche

Classe di consistenza	Abbassamento cono in mm	Denominazione corrente
S1	Da 10 a 40	Umida
S2	Da 50 a 90	Plastica
S3	Da 100 a 150	Semifluida
S4	Da 160 a 200	Fluida
S5	> 210	Superfluida

Figura 3.6.2 Classi di consistenza da www.sistemieditoriali.it

meccaniche alla struttura finita. Il loro utilizzo consente di ridurre il tenore del cemento ed hanno un basso costo. Sono anche definiti "inerti" perché non prendono parte alle reazioni che avvengono nel calcestruzzo. La loro caratteristica principale è la granulometria: se inferiore a 4 - 5 mm prende il nome di aggregato fine o sabbia; se i granuli sono più grossi è chiamato ghiaia, pietrisco o aggregato grosso.

La norma UNI 8520 classifica gli inerti in naturali (sabbia, ghiaia, ciottoli, graniglia e pietrisco) e artificiali (scisti[24] e argille espanse, vermiculite[25], perlite[26]). L'idoneità di un inerte è anche condizionata dall'assenza di sostanze nocive, quali cloruri, solfati, solfuri, silice alcali-reattiva, miche e sostanze organiche. La loro presenza potrebbe compromettere la durabilità del conglomerato cementizio. Non tutti gli inerti naturali sono però idonei,

24 Roccia metamorfica caratterizzata da una tessitura tendente a sfaldarsi facilmente in lastre sottili.

25 Aggregato leggero ottenuto dalla cottura di rocce ricche di mica, con struttura lamellare.

26 Materiale espanso, ottenuto dal riscaldamento di ricce vulcaniche come l'ossidiana. Serve per produrre calcestruzzi leggeri.

in quanto devono essere rispettati alcuni requisiti che impediscano il formarsi di degradi all'interno del prodotto finito. La qualità è determinata, oltre che dal grado di purezza e di durezza, anche dalla dimensione granulometrica.

Le caratteristiche dell'aggregato influiscono sulle proprietà del calcestruzzo indurito, ma anche di quello fresco. Per avere un buon prodotto il volume complessivo dell'aggregato deve essere dal 65% al 75% all'interno del calcestruzzo. Quindi per ogni metro cubo da ottenere si dovranno aggiungere dai 650 ai 750 litri di inerte.

Le funzioni degli aggreganti sono varie:

- conferire buone proprietà meccaniche;
- ridurre la quantità di legante;
- ridurre il calore di idratazione (minor legante);
- ridurre il costo del conglomerato (meno cemento);
- contrastare il ritiro della pasta legante (elevato modulo elastico).

Agiscono su diverse proprietà del calcestruzzo: fisiche, chimiche, e meccaniche. Come facilmente intuibile, gli aggregati grossi conferiscono alla struttura importanti caratteristiche come la resistenza alla compressione. Per valutare il grado di resistenza si effettuano prove di laboratorio su appositi provini. Si predispongono, in particolare, provini cubici con facce spianate, sui quali si agirà, con macchinari, per provocare lo schiacciamento, fino al punto di rottura. La misura delle pressioni indicherà la bontà del materiale. Nella tabella sottostante si nota l'aumento della resistenza, al crescere della dimensione degli aggregati.

La granulometria è un altro indicatore del tipo di calcestruzzo ed è codificata dalle norme EN 933-1. La sua importanza risiede nella necessità di evitare la formazione di vuoti interstiziali: più l'inerte risulta ben assortito, meglio i grani fini colmeranno le cavità presenti tra quelli grossi.

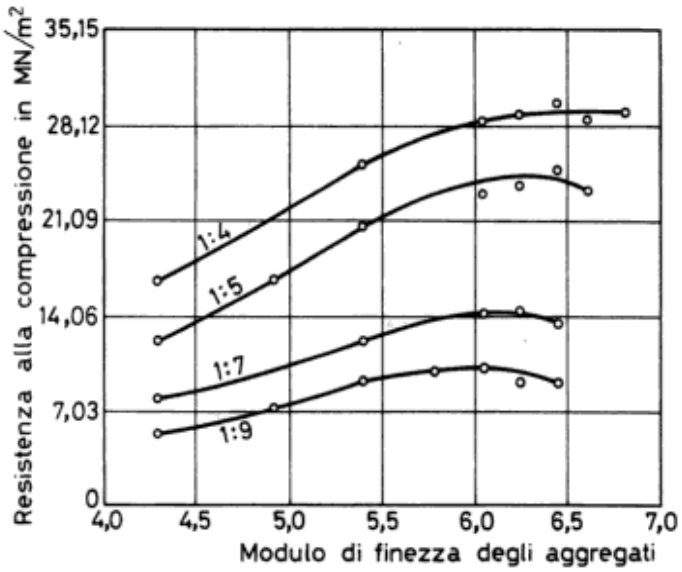


Figura 3.6.3. Resistenza alla compressione e modulo di finezza aggregati da ww2.unime.it

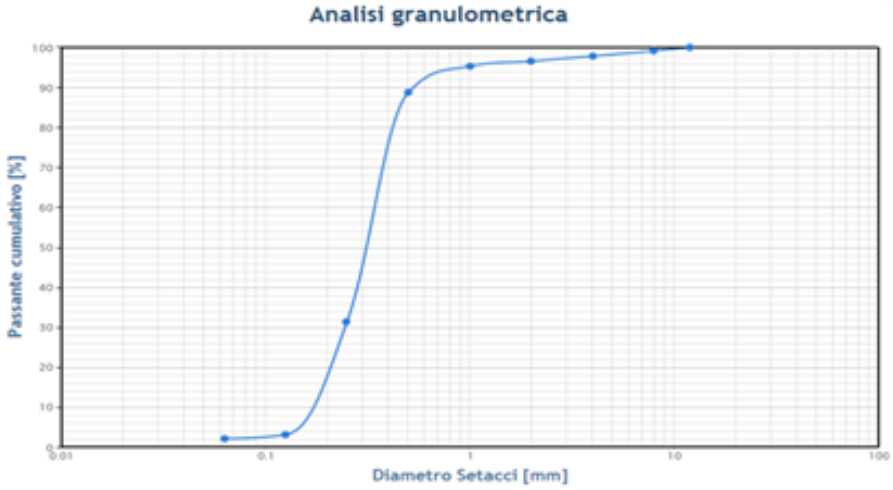


Figura 3.6.4 Curva granulometrica

Per realizzare un buon conglomerato, con una buona distribuzione granulometrica, e quindi con la massima densità possibile, la curva granulometrica (Figura 3.6.4.) deve seguire l'equazione di Fuller e Thompson:

$$PC_i = 100 \cdot \sqrt{\frac{d}{D}}_{max}$$

dove PCi (%) è la percentuale di materiale che riesce a passare; d è l'apertura dei fori del setaccio; D_{max} è la massima dimensione dell'elemento lapideo più grande. Ovviamente il valore D_{max} deve risultare inferiore della dimensione del setaccio. Il diametro degli inerti e la loro forma possono influenzare la richiesta d'acqua per ottenere una determinata lavorabilità. Le forme sferoidale richiedono meno acqua, mentre quelle con spigoli ne richiede molta, perché la scorrevolezza tra gli elementi è minore. È quindi meglio limitarne la quantità sul totale di questi elementi non sferoidali (max 20-25%).

Gli additivi ingredienti fondamentali del calcestruzzo. Per alcuni motivi, già accennati, rivestono sempre più un ruolo determinante, anche nell'ottica della sostenibilità. Sono prodotti chimici aggiunti in piccole quantità con lo scopo principale di migliorarne le prestazioni. Nella norma UNI EN 934-2 il loro quantitativo viene fissato al 5%, rispetto alla massa del cemento. In essa si trovano anche specifiche inerenti le definizioni e i requisiti richiesti per i vari tipi di calcestruzzo: non armato, armato, premiscelato, prefabbricato, precompresso, e calcestruzzo miscelato sul posto. I requisiti indicati si applicano ai calcestruzzi di consistenza normale. Potrebbero però non essere applicabili agli additivi destinati a calcestruzzi particolari, come quelli per impasti a consistenza semi-secca e a terra umida.
La normativa prevede la distinzione degli additivi in base alla loro funzione. Vengono quindi considerate le seguenti tipologie di additivi:

- ritentori di acqua
- riduttori dell'impiego di acqua ma anche fluidificanti e riduttori dell'impiego acqua ad alta efficacia con effetto superfluidificante
- aeranti,
- acceleranti e ritardanti della presa
- acceleranti del processo di indurimento
- additivi impermeabilizzanti all'acqua
- ritardanti della presa oltre che riduttori di acqua e fluidificanti
- ritardanti della presa e riduttori di impiego di acqua ad alta efficacia con effetto superfluidificante
- acceleranti della presa e riduttori dell'impiego di acqua e fluidificanti
- additivi modificatori della viscosità.

Gli additivi necessitano anche di specifiche normative, che identificano come realizzare le prove sui provini. Le normative riguardano sia il calcestruzzo fresco (UNI EN 12350), sia quello indurito (UNI EN 12390), altre ancora sono incentrate sulle malte per iniezione (UNI EN 480).
Il quadro normativo e qualitativo è quindi molto vario e si presta ai più svariati prodotti, atti a conferire buone prestazioni e proprietà al calcestruzzo indurito.
Come si è visto il processo di idratazione necessita di diverso tempo, ma le caratteristiche meccaniche del prodotto finito saranno importanti e legate alla durabilità nel tempo.
Le proprietà di esercizio del manufatto saranno legate alle caratteristiche meccaniche che il provino di calcestruzzo presenterà.
La resistenza meccanica è la più rilevante: rappresenta il massimo sforzo che un materiale sopporta prima della rottura. Può essere di tre tipi, a seconda del tipo di sforzo applicato: a compressione, a flessione, oppure a trazione. Per ognuna di queste prove, si avranno diverse resistenze. In generale, i calcestruzzi si comportano bene rispetto allo sforzo a compressione, ma non altrettanto sotto l'azione di quella a trazione diretta o a trazione per flessione. Per questo si utilizzano le armature metalliche che aumentano questi ultimi sforzi.
La resistenza a compressione dipende, a parità di temperatura, dal rapporto tra l'acqua e il cemento, realizzato nell'impasto del calcestruzzo. Per misurarla si sottopongono i provini al massimo grado di compattazione possibile. Il risultato potrebbe anche dipendere dalla presenza di vuoti residui, dovuti per il difetto di bassa costipazione, a causa di aria intrappolata.

La resistenza caratteristica a compressione è valutata dopo 28 giorni di maturazione (come già visto, per la normativa europea UNI EN 197/1). Rappresenta un valore di minimo, ottenuto tramite un'analisi statistica inferenziale[27], considerando un intervallo di confidenza del 95%. In questo modo si può affermare che almeno il 95% dei provini sia in grado di eguagliare o superare il valore di resistenza minima.

Applicando il carico al provino, si verifica, ovviamente, una contrazione nella direzione di applicazione e un rigonfiamento nelle facce laterali. La velocità di applicazione influenza la resistenza a compressione che si vuole misurare. Queste variazioni sono minori se la prova è più rapida e maggiori se più lenta.

La spiegazione è da ricercare nel tempo di propagazione dello sforzo, attraverso le fessure interne.

Quando il calcestruzzo è sollecitato con valori bassi si comporta in modo elastico. La caratteristica meccanica che definisce questo comportamento è il modulo elastico che aumenta all'aumentare della resistenza a compressione. Il valore viene misurato secondo la norma UNI 6556, ed è definito come il rapporto tra lo sforzo applicato e la deformazione prodotta. La sua unità di misura è la stessa della pressione, cioè il pascal, o Newton su metro quadro (N/m^2).

Le altre resistenza, a trazione e a flessione, dipendono dal rapporto acqua cemento, ma anche dal grado di idratazione e dal tipo di inerte. Se ha spigoli e forme irregolari la resistenza sarà più alta. Queste resistenze saranno minori se, invece, predominano inerti di forma sferoidale.

27 Metodologia che consente di indurre previsioni o caratteristiche di una popolazione, ricorrendo solo all'osservazione di campione, che è una parte di essa.

Per eseguire la prova di trazione diretta, si deve preparare prima il provino, incollandolo con resine epossidiche, a due testate metalliche. Il carico verrà poi applicato a due perni solidali alle testate stesse, in modo che trasmettano lo sforzo al calcestruzzo. Il volume sarà completamente sollecitato, e la presenza di difetti sarà rivelata dai risultati.

Con la prova a flessione, invece, si misura il modulo elastico, stimando quindi quella che dovrebbe essere la tensione di rottura.

Per realizzare la prova si ricorre a posizionare tre vincoli sui provini, due serviranno per l'appoggio inferiore, e uno, localizzato nel centro, servirà per esercitare la sollecitazione. Viene quindi misurata la massima sollecitazione di trazione rispetto la fibra più bassa e questa indicazione rappresenta il modulo di rottura. I difetti che potrebbe avere il calcestruzzo influenzano poco questa prova. Ma, nell'insieme, si può misurare la performance e stabilire l'idoneità del prodotto per l'impiego e le caratteristiche dei vari tipi di calcestruzzi.

Non si deve certamente dimenticare che questo materiale ha una funzione edile importante e gli studi attuali cercano di migliorarlo, passando attraverso le migliori (o peggiori) caratteristiche tecniche, e attraverso la migliore sostenibilità.

Siccome i prodotti sono molteplici, con innumerevoli applicazioni, è possibile trovare nuovi calcestruzzi con rapporti costi/benefici accettabili, che rendano i prodotti futuri competitivi, intendendo come costi sia quelli economici che ambientali.

In quest'ottica risultano rilevanti gli impatti ecologici degli attuali materiali da costruzione e, risulta rilevante l’esigenza di ricorrere a prodotti alternativi.

3.7 Impatti ecologici

Quando si pensa all'emissione complessiva di anidride carbonica del calcestruzzo (la sua carbon footprint), si dovrebbe ricordare, come già accennato, che è nella realizzazione del cemento che si ha il contributo maggiore. Ad esempio con il cemento Portland può variare dal 74% all'81% rispetto alle emissioni totali. Il contributo dalla produzione degli aggregati è intorno al 13%-20%, mentre le fasi di cantiere, come la messa in opera ma anche il trasporto, sono trascurabili in termini di emissioni di CO_2, anche perché difficilmente le distanze sono grandi visto la facile reperibilità delle materie prime.

Esaminando ancora più in dettaglio, per produrre una tonnellata di cemento Portland, si generano 0,55 tonnellate di CO_2, con ulteriori 0,39 tonnellate per la cottura e macinazione del clinker, a causa dei combustibili fossili, per un totale di 0,94 tonnellate di CO_2. Quindi solo per il cemento si ha quasi un rapporto uno ad uno.

Per produrre un calcestruzzo performante, anche dal punto di vista ecocompatibile, serve un accurato studio per l'individuazione dei rapporti tra gli ingredienti, ma occorre anche prestare attenzione alle fasi esecutive. La riduzione di emissioni di anidride carbonica nelle fasi di miscelazione, trasporto, posa in opera, compattazione, disarmo e stagionatura, non sarà mai determinante, occorre quindi agire sul clinker.

3.8 Cementi Alternativi

Secondo i dati del WWF, la produzione di calcestruzzo nel 2030 potrebbe raggiungere 5 miliardi di tonnellate, valore doppio dei 2,3 miliardi del 2005.

Considerando inoltre che, durante la fase produttiva, si ha un consumo medio di 5 gigajoule di energia per ogni tonnellata di cemento e che i rifiuti prodotti non sono facilmente smaltibili, si capisce perché la sperimentazione di materiali sostenibili ed innovativi sia in pieno sviluppo. Una proposta sperimentale è arrivata alcuni anni fa dal Giappone con l'ecocemento. Lo sviluppo di questo materiale ha superato la prima fase e ha ricevuto il benestare della NEDO, New Energy Development Organization, facente capo al Ministero Giapponese del Commercio e dell'Industria. La ricerca è stata affidata alla fondazione Clean, con la collaborazione di alcune compagnie private. Gli obiettivi della ricerca sono incentrati nella sostituzione di almeno il 50% dei componenti principali del materiale, con ceneri prodotte da inceneritori urbani o di altri rifiuti. Si cerca di seguire metodi di produzione rispettosi dell'ambiente, seguendo un sistema di riciclo completo. Le ceneri, però, presentano problematiche legate all'elevata quantità di cloruri che corrodono i ferri di armatura. La decomposizione e inserimento di queste sostanze è al centro del progetto. Il gruppo di ricerca ha previsto la realizzazione di due diversi tipi di materiali: un eco-cemento di tipo Portland; un cemento del tipo a rapido indurimento (Jet Cement), con elevate prestazioni meccaniche. Queste buone caratteristiche sono dovute alla formazione di un fluoro-alluminato di calcio ($C_{11}A_7 \cdot CaF_2$).

Nel Jet Cement si sfrutta il cloruro in eccesso nella cenere, per favorire la formazione nel clinker di un cloro-alluminato di calcio ($C_{11}A_7 \cdot CaCl_2$).

Da un altro continente giunge una differente proposta. L'Istituto Politecnico Nazionale messicano ha messo a punto un cemento sostenibile, con un ridotto impatto ambientale. Nel suo ciclo di vita, dovrebbe diminuire le emissioni di CO_2. Il Cinevestav (centro di ricerca e studi avanzati

dell'Istituto Politecnico Nazionale del Messico) punta alla realizzazione di un cemento in grado di sostituire quello Portland. Il punto focale risiede nella modifica del processo di combustione: alcuni materiali sintetici, a base di geopolimeri, come gli alluminosilicati, potrebbero servire per produrre il cemento a temperature di soli 750 °C, meno della metà dei 1450 °C necessari per cuocere attualmente il clinker. Il risultato non sarebbe solo quello di ridurre i consumi energetici, ma anche il calo di emissioni di anidride carbonica. Per ogni grammo di clinker sono necessari circa 1700 Joule, ma la produzione non è efficiente e il rendimento degli impianti molto basso. Quindi, in realtà, per ottenere il calore necessario si brucia un equivalente energetico pari a 3000 Joule. I ricercatori messicani hanno calcolato che, tra tutte le emissioni di gas serra di origine umana, circa l'8% provengono dalla produzione di cemento, e questo innovativo prodotto potrebbe ridurle sensibilmente.

Questo cemento sostenibile possiede anche alte resistenze agli agenti chimici, e alle sollecitazioni meccaniche.

Un'altra soluzione arriva dal Regno Unito: il cemento monossodo-assorbente. L'azienda Novacem, insieme all'Imperial College of London, ha studiato un tipo di cemento in grado di assorbire il monossido di carbonio presente in atmosfera. Il processo avviene durante l'indurimento del conglomerato, compensando in questo modo le emissioni della fase di produzione. Questo materiale richiede meno energia per il suo realizzo, grazie alla presenza di ossido di magnesio e di speciali additivi di origine minerali. Il loro mix richiede temperature di cottura inferiori.

È stato stimato che se in tutto il pianeta si producesse solo questo cemento, al posto di quelli tradizionali, si ridurrebbe del 75% l'anidride carbonica dovuta al cemento.

Molte altre proposte si stanno diffondendo, anche seguendo ricerche non convenzionali. Come quella che vede l'impiego di scarti della raffinazione del riso, sempre più una risorsa nel settore della bioedilizia. La materia prima è la pula di riso, o “lolla di riso”, la pellicola che ricopre i chicchi ancora sulla pianta, poi eliminata durante la lavorazione del prodotto. Potrebbe essere recuperata per la produzione di un nuovo cemento eco-sostenibile, perché contiene, in grande quantità, un componente fondamentale del calcestruzzo: l’ossido di silicio. Questo progetto è stato sviluppato da un team di ricercatori texani, del ChK Group Inc.

In passato altri tentativi fallivano da parte di altri gruppi di ricerca, per l’eccessiva presenza di carbonio nella cenere della pula. Ma ora si è riusciti ad isolarlo mediante un processo che lo espelle. Purtroppo, la sostanza dovrebbe subire una cottura a circa 800 °C, in strutture senza ossigeno. Questo significa l'impiego di grandi quantità di energia, ma con alcuni benefici: la minore emissione di CO_2, e la riduzione dell'acqua impiegata. Il costo del cemento sarebbe anche sostenibile.

Nel 2014 iniziò un progetto italiano di un cemento autopulente e “mangia smog”. Lo sviluppo del materiale rispose all’esigenza della resistenza nel tempo e della protezione dall’azione degli agenti inquinanti. L'obiettivo di questo prodotto era ridurre gli interventi di manutenzione sulle facciate annerite degli edifici. I ricercatori hanno infatti inserito il biossido di titanio nella composizione del cemento. Questa molecola riesce ad attivare l'ossigeno dell'aria, innescando una fotocatalisi, che velocizza l'ossidazione naturale. Quindi è l'ossigeno stesso a decomporre le sostanze inquinanti, trasformandole in nitrati e carbonati, lavabili con l'acqua piovana. Il materiale è stato già usato diverse volte, in Italia e in Europa, come per la

realizzazione della chiesa Dives in Misericordia a Roma, dall'architetto statunitense Richard Meier.

4. IL BIO-CHAR

4.1 La produzione del Bio-char

Il filone della ricerca di nuovi materiali interessa anche il bio-char: un materiale a grana fine e porosa. La definizione adottata dalla International Bio-char Initiative (IBI) prende in considerazione l'applicazione dello stesso, volta al miglioramento della resa agricola e alla protezione dell'ambiente.

La produzione di carbone vegetale, in ambiente privo di ossigeno, ha una lunga tradizione storica risalente al 1600, mentre l'uso di carbone risale a molto prima, come testimoniato dai dipinti presenti in grotte di oltre 35 mila anni fa. Ma, nonostante gli antichi impieghi, vi è ancora una carenza nella nomenclatura, anche in quella scientifica, perché sovente i vari prodotti, derivanti della combustione di biomasse, (char, charcoal, soot, carbonio grafitico, cenere, coal e black carbon) sono confusi tra loro. Solo recentemente si è aggiunto il termine bio-char a questa lista, per indicare il prodotto derivante dalla pirolisi di materia organica specificatamente per essere applicato ai suoli sia per uso agronomico che di gestione ambientale. Da questo punto di vista, il bio-char è qualcosa di nuovo in termini di applicazione e di finalità, ma non per quanto concerne la sua produzione.

Il termine bio-char, nel linguaggio comune ma anche nella letteratura scientifica, è spesso utilizzato al posto del charcoal e viceversa. Per differenziare i termini ed evitare confusioni, è opportuno procedere alla precisazione dei vari materiali, anche se spesso le differenze sono minime avendo origine tutti dal riscaldamento di materiali ricchi di carbonio. Questi prodotti presentano, però, differenti caratteristiche chimico-fisiche, anche

se in determinati casi, molto particolari, le differenze possono essere meno marcate.

Il *Charcoal*, che viene prodotto dalla decomposizione termica del legno e di materiali organici, è impiegato come combustibile per il riscaldamento domestico. Tradizionalmente si utilizza anche come ammendante[28], cioè per migliorare le caratteristiche nutritive di un terreno nel quale viene inserito. È prodotto in forni a 450-500 °C, temperature simili a quelle della pirolisi industriale, ma con rese della materia prima più basse. Inoltre, tutto il calore, gli inquinanti gassosi e il liquido generati si disperdono durante il processo di combustione.

Il *Char* è un altro prodotto solido ottenuto dalla pirolisi di qualsiasi materiale organico, ma anche come residuo di alcuni incendi naturali, dove il materiale carbonizzato contiene generalmente una minor quantità di carbonio. Char è quindi il termine più generale per definire un residuo di pirolisi o di incendio, anche se la natura organica del materiale di partenza è differente.

Il *Carbone attivo* è invece generato dal riscaldamento di materiale carbonioso ad alta temperatura, sopra i 500 °C, e per esposizioni prolungate. Il materiale risultante ha un'elevata capacità di adsorbimento[29]; non viene utilizzato come ammendante del suolo, ma per processi di pulizia, infatti, grazie alla sua elevata area specifica, è in grado di trattenere al suo interno molte molecole di altre sostanze. È anche utile come depuratore dell'acqua e riesce ad adsorbire vari contaminanti liquidi, solidi e gassosi.

Con il termine *Black carbon* non si identifica uno specifico materiale ma la

28 Materiale o prodotto che migliora il terreno dal punto di vista nutritivo.

29 Fenomeno chimico-fisico che consiste nell'accumulo di una o più sostanze fluide (liquide o gassose) sulla superficie di un condensato (solido o liquido)

vastità di tutti i residui ricchi in carbonio, ottenuto per combustione o a causa di incendi, come char, charcoal, bio-char, fuliggine, nerofumo e grafite. I combustibili fossili (carbone, gas, petrolio) e le biomasse possono produrre black carbon.

Il *Bio-char* è invece il residuo carbonioso di pirolisi o gassificazione, prodotto specificatamente per essere applicato nei suoli per uso agronomico, ma anche per una gestione ambientale e stoccaggio del carbone. Si ottiene riscaldando la biomassa a una temperatura di 400 - 800 °C in assenza di ossigeno. Il materiale risultante è caratterizzato da elevata porosità, conferendo ad ogni grammo di materiale una superficie complessiva di oltre 300 m^2, considerando l'intero sviluppo interno delle micro cavità.

La pirolisi e la gassificazione sono i principali sistemi utilizzati dalle industrie bioenergetiche per lo sfruttamento delle biomasse come fonti energetiche e per la produzione conseguente di bio-char. Il processo di gassificazione può essere definito come la conversione termochimica di un combustibile solido o liquido in un gas, mediante presenza di un agente gassificante ed altri prodotti reagenti come l'ossigeno nell'aria, il vapor d'acqua e l'acqua. In questo processo, a differenza della pirolisi, si verifica una parziale combustione, con sviluppo di alte temperature in cui, attraverso il controllo della quantità di ossigeno, la biomassa viene decomposta principalmente in “syngas”, una miscela gassosa costituita principalmente da azoto (50%), idrogeno (15-20%), metano (3-5%), monossido e diossido di carbonio (ciascuno 15-20%).

La temperatura di lavorazione influenza anche il contenuto di carbonio presente nei vari composti generati. Nel bio-char, ad esempio, si ha un andamento direttamente proporzionale all'aumento della temperatura,

aumentando dal 56% al 93% tra 300 e 800 °C. Dopodiché l'andamento si inverte: qualsiasi ulteriore aumento di temperatura o tempo di reazione diminuisce il rendimento del bio-char, senza aumentare il suo contenuto di carbonio (questo è dovuto ad un aumento di ceneri). Nel processo di pirolisi veloce, la resa del componente bio-oil può essere massimizzato a circa 500 °C, con circa il 67% della materia prima convertita. Il restante 33% viene convertito in syngas (13%), acqua (6%) e bio-char carbone (14%).
Nei grafici qui sotto si evidenziano questi processi di formazione durante la pirolisi.

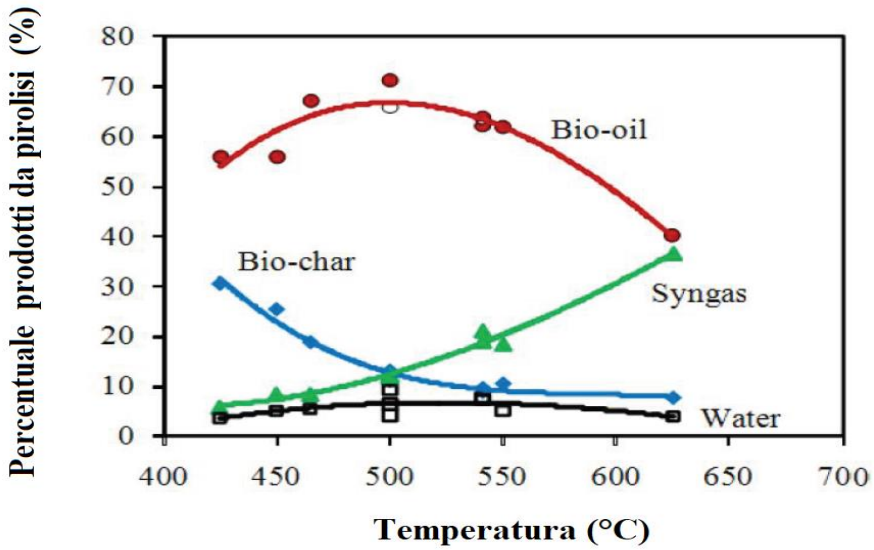


Figura 4.1.1 Prodotti dalla pirolisi

Dal processo non si ottengono solo ceneri di scarto, ma anche energia legata alla conversione dei rifiuti in biomassa.
Inoltre, i materiali prodotti dalla combustione trovano diverse applicazioni.

4.2 Le diverse applicazioni del Bio-char

Nelle varie sperimentazioni si stanno sviluppando nuovi interessanti utilizzi del Bio-char. In particolare, si possono sfruttare alcune caratteristiche legate alle micro particelle pirolizzate. Le loro eccezionali proprietà meccaniche potrebbero rivelarsi molto utili nella preparazione degli impasti cementizi, contribuendo alla produzione di materiali da costruzione più sostenibili. I bassi costi e le minori emissioni di CO_2 sono ulteriori fattori positivi. Inoltre, queste particelle provengono dai rifiuti di un processo che non riguarda la tecnologia del calcestruzzo bensì il recupero di energia da biomassa. Quindi si osservano tre possibili livelli di beneficio: il primo dovuto ad un riciclo di materiali di origine organica; il secondo riguarda la produzione di energia; il terzo è legato al fatto che queste micro particelle pirolizzate potrebbero conferire proprietà meccaniche al calcestruzzo evitando l'impiego di altre sostanze.

Questo tipo di approccio consente anche di rispondere alle esigenze europee di uso sostenibile delle risorse naturali che sta diventando un tema importante nel complesso settore dei materiali da costruzione.

Attualmente il Bio-char è usato principalmente in agricoltura come ammendante del suolo e, nell'allevamento del bestiame trova impiego come integratore alimentare. Anche nelle lavorazioni industriali ha visto un utilizzo come agente riducente per la produzione dei metalli. Nel campo della bonifica ambientale, il Bio-char viene utilizzato per la pulizia delle acque grigie. Un altro campo è quello tessile: qui viene introdotto come componente di alcuni tessuti per abbigliamenti sportivi ed è in grado di svolgere funzioni di assorbitore. Industrialmente viene anche sperimentato all'interno di batterie, sempre per la sua propensione ad essere un riducente

chimico. Ha trovato anche applicazione come componente negli asfalti.
Per quanto riguarda il settore delle costruzioni, le ultime ricerche hanno dimostrato che il Bio-char ha eccellenti proprietà isolanti. La sua struttura porosa, ricca di superfici, è in grado anche di agire come filtro per l'aria, migliorandone la qualità. Riesce quindi ad assorbire facilmente l'umidità e protegge in parte anche dalle radiazioni.
Inoltre può essere utilizzato come materiale isolante negli edifici per la regolazione dell'umidità.
Diverse sperimentazioni hanno visto il Bio-char in combinazione con l'argilla oppure con la calce e la malta cementizia. Con l'aggiunta di due parti di sabbia si sono realizzati ottimi intonaci. In questo modo saranno migliorate le caratteristiche degli intonaci interni con più alte proprietà isolanti. Anche il grado di umidità sarà regolato dal prodotto, rimanendo nel range tra il 45% e il 70%, sia in estate che in inverno, prevenendo anche lo sviluppo di muffe.
Il Bio-char è stato introdotto anche nei compositi a base cementizia, mostrando risultati promettenti. Le particelle carbonizzate inerti migliorano la resistenza alla flessione e il comportamento a frattura. Tuttavia le prestazioni risultano dipendere dalla fonte organica impiegata. Negli ultimi anni, sono state studiate le micro particelle pirolizzate provenienti dal bambù, dai gusci di noce di cocco, dalla canapa e dalla fuliggine di carbonio. Purtroppo i materiali prima del loro uso come inerti devono spesso essere ricotti e chimicamente trattati per migliorare la performance.
Il Bio-char ha trovato anche applicazione nei mattoni, legato con cemento, calce o fango. L'uso più interessante è certamente la sua aggiunta nei compositi a base cementizia. Esso, infatti, possiede una granulometria molto fine, con dimensione sulla scala dei micron. Può quindi essere

inserito nella miscela cementizia come inerte in quanto non reagisce con la matrice di cemento. Tuttavia, nel Bio-char, si riscontra una elevata presenza di carbonio e, generalmente, quando quest' ultimo aumenta all'interno del cemento cresce anche la richiesta di acqua nel calcestruzzo per ottenere la lavorabilità desiderata. Come già visto in precedenza, questo comporterebbe una riduzione della resistenza a compressione con un aumento del suo tasso di sostituzione. Ma l'elevata capacità di ritenzione idrica del carbonio, presente nel Bio-char, aiuta l'assorbimento all'interno delle micro strutture dello stesso. L'acqua, però, non si lega chimicamente al carbonio in modo da essere gradualmente rilasciata durante la fase di idratazione. Questo fenomeno aiuta il processo di idratazione nei primi giorni fornendo buone condizioni di polimerizzazione per il calcestruzzo e, consente lo sviluppo della microstruttura e la porosità tale da migliorare anche la durabilità nel tempo. Inoltre, la capacità di ritenzione comporta anche una minore evaporazione dell'acqua, riducendo sia il ritiro plastico che il ritiro per essiccazione.

Questo risultato è paragonabile a quello di un agente auto-indurente nel calcestruzzo.

5. MECCANICA DELLA FRATTURA

5.1 Introduzione alla frattura

La meccanica della frattura è il campo che si occupa di studiare gli effetti delle crepe, delle incrinature e, in generale, dei difetti di un materiale sullo sforzo applicato al corpo per osservare e misurare le condizioni di cedimento. In particolare, focalizza l'attenzione sui singoli campi tensoriali che hanno origine dall'apice della fessura. I concetti presi in considerazione sono gli sforzi, le energie di frattura e le forza di frattura. L'approccio classico descrive il fenomeno per mezzo di alcuni parametri universali, cioè indipendenti dalla dimensione della struttura stessa. I parametri principali sono le tensioni, cioè pressioni σ_u, forze applicate su superfici, misurabili in Pa o in N/m^2, che descrivono il cedimento di una struttura, che si può verificare in vari modi:

- quando il valore della tensione, applicata alla struttura integra, supera il livello di tensione ammissibile;
- in presenza di cricche[30] o intagli;
- a seguito alla "fatica" strutturale, prodotta da carichi ripetuti, anche se le tensioni risultano inferiori a quelle ammissibili del materiale.

Sovente gli elementi strutturali sono soggetti a rotture improvvise, le sollecitazioni possono essere statiche e inferiori alla tensione di rottura del materiale. Questi cedimenti non sono prevedibili dall'osservazione di deformazioni macroscopiche, perché non sono visivamente apprezzabili, ma la causa è da ricercare nella presenza di difetti interni.

30 Crepe o incrinature nelle strutture.

Applicando l'analisi degli sforzi e delle deformazioni a livello microscopico, è possibile studiare questi difetti interni. La meccanica della frattura permette, quindi, di predire il comportamento macroscopico dei corpi attraverso l'analisi della tenacità a frattura e delle tensioni. Quindi è uno strumento in grado di indagare il comportamento meccanico dei materiali e aiutare la sperimentazione di nuovi prodotti, nel caso specifico, applicabile all'indagine sui calcestruzzi.

Lo stato di sforzo[31], cui è sottoposto un corpo, è funzione delle condizioni geometriche e delle sollecitazioni applicate, ma anche della costituzione del materiale, che determina il comportamento che si produce a seguito dell'applicazione dello sforzo.

Conseguentemente allo stato di sforzo, lo studio meccanico può essere suddiviso, per analisi e osservazione, in tre gruppi:

- la meccanica della frattura elastica lineare (LEFM), idonea per quei materiali con un comportamento elastico lineare;
- la meccanica della frattura elastoplastica (EPFM), per i materiali con comportamento elastoplastico;
- la meccanica della frattura viscoelastica, per quei materiali aventi comportamento viscoelastico (dipendente dal tempo).

5.2 Softening

La classificazione del calcestruzzo viene effettuata sulla base della resistenza a compressione.

La relazione che intercorre tra la tensione subita e la deformazione prodotta

31 Insieme delle varie tensioni, racchiuse nella matrice delle tensioni di Cauchy, indicato con il simbolo σ, detto tensore.

(σ-ε), a seguito di una prova di compressione, è un legame intrinseco del calcestruzzo, ed è illustrato nella Figura 5.2.1.

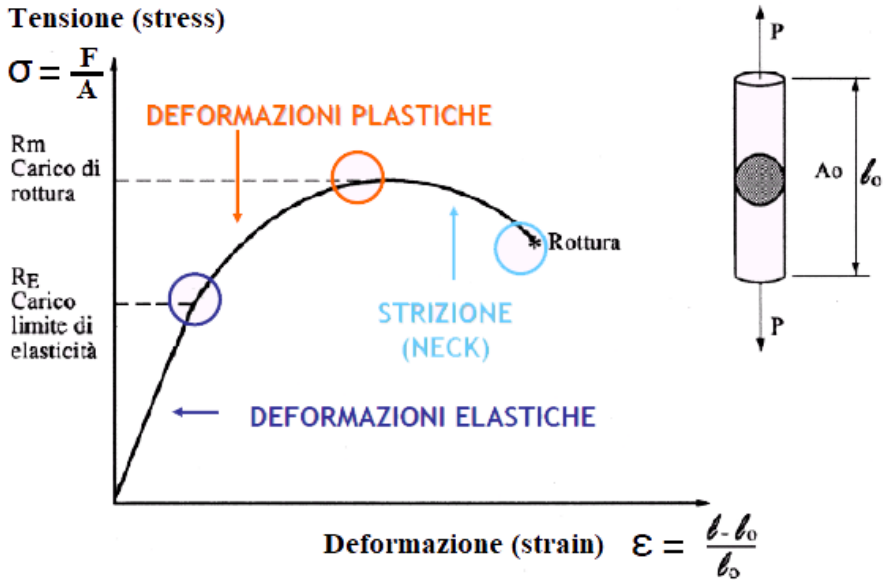


Figura 5.2.1. Diagramma σ-ε

Dove i termini sugli assi sono:

tensione (stress): $\sigma = \frac{F}{A_0} \left[\frac{N}{m^2}\right]$

deformazione (strain): $\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \left[\frac{m}{m}\right]$

Generalmente, un materiale, sottoposto ad una piccola sollecitazione, si deforma in modo reversibile, rimuovendo la sollecitazione applicata torna alla sua geometria iniziale. Questo rientra nel comportamento elastico ed esiste un valore limite oltre il quale il materiale assume un comportamento detto plastico. Segue la Legge di Hooke: la deformazione è proporzionale allo sforzo (piccole deformazioni). La relazione tra le variabili tensione e deformazione è caratterizzato da un primo tratto lineare, che può essere

considerato elastico lineare: la deformazione del provino mostra un andamento proporzionale allo sforzo fino a circa il 30% della tensione massima. Le deformazioni non sono permanenti e scompaiono rimuovendo il carico. Il rapporto tra la tensione applicata e la deformazione prodotta è costante ed è una caratteristica del materiale. Prende il nome di modulo di Young:

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

Indica la pendenza del tratto lineare nel diagramma σ-ε. Diminuendo la sollecitazione, il punto torna indietro fino all'origine, seguendo lo stesso tracciato a ritroso. Il comportamento lineare viene meno se il carico diviene eccessivo, con la conseguente riduzione di rigidezza fino alla tensione di picco. Al crescere ulteriore dello spostamento, si verificherà un comportamento degradante, o con softening, cioè con riduzione del carico al crescere della deformazione, fino al raggiungimento della rottura.
I materiali privi di una zona di strizione[32] hanno poca duttilità e si possono quindi considerare fragili. Nel diagramma, non mostrano deformazione prima del raggiungimento della frattura. La poca duttilità dipende da più fattori: dalla temperatura, dalla tipologia dell'ambiente, dalla velocità di deformazione, dallo stato interno di tensioni residue o dal tipo di materiale. Prima della rottura, questi materiali non presentano una deformazione plastica. Per loro si avrà una frattura "fragile" (brittle fracture), che avviene con una netta separazione su di un piano perpendicolare, rispetto alla direzione di applicazione del carico, e la superficie di frattura è in genere piatta.

32 riduzione della sezione del provino prima dell'effettivo collasso dello stesso

Il comportamento macroscopico di questa tipologia di frattura è elastico fino al punto di frattura.

Il cemento è un materiale che si comporta in modo fragile. Inoltre, la letteratura sperimentale ha dimostrato che la resistenza a trazione non è una proprietà universale del materiale, poiché dipende dalle dimensioni geometriche della struttura. Infatti, aumentando la dimensione del campione, la sua resistenza alla trazione diminuisce, e sarà una funzione anche delle micro-fessure presenti in esso. La resistenza e la duttilità non sono quindi caratteristiche intrinseche del materiale, bensì legate alle dimensioni strutturali. Di conseguenza, è necessario specificare la dimensione della struttura e, attraverso un'apposita legge di ridimensionamento.

In Italia la prova a compressione viene eseguita su provini di forma cubica aventi lato pari a 15 cm (con alcune eccezioni, come ad esempio in studi sperimentali). Il calcestruzzo deve avere 28 giorni di maturazione e la misura fornisce una Resistenza cubica.

La resistenza alla frattura indica le relazioni tra la lunghezza della fessura, la capacità intrinseca del materiale di resistere alla crescita della fessura, e lo stress con cui una lunghezza critica della fessura provoca il collasso.

Il carico sui provini può essere applicato in vari modi:

- tramite trazione (mode I, opening mode), che produrrà il distacco delle due parti con l'apertura della cricca;
- con uno sforzo a taglio (mode II, in-plane shear mode), che farà scorrere una sull'altra le due parti;
- usando la torsione (mode III, out-of-plane shear mode), che produrrà la lacerazione.

Il modo I è sicuramente il più pericoloso per le strutture e si presenta più

spesso nei componenti intagliati. Per questo necessita maggior attenzione lo studio della relazione tra tensione applicata e la presenza di cricche.
Il valore di tensione al di sopra del quale la deformazione inizia ad aumentare rapidamente, senza più un incremento proporzionale, è definita tensione di snervamento**,** ed è la separazione tra lo stato elastico a quello plastico. Nei materiali duttili questo punto è facilmente identificabile, perché la tensione rimane quasi costante, e graficamente si nota un tratto orizzontale (vedi grafico a sinistra).
Invece, nei materiali fragili non si osserva una brusca variazione della pendenza nel diagramma e la tensione di snervamento è difficilmente individuabile. Per convenzione, si considera un valore di tensione ottenuto dall'intersezione tra il diagramma σ-ε e una retta, generata parallelamente al tratto sul diagramma avente andamento rettilineo, ma spostata di un valore prefissato, compreso tra 0.1 % e lo 0.2%. Superato lo snervamento, la rottura avviene senza apprezzabile deformazione.

5.3 Meccanica della frattura elastica lineare (LEFM)

5.3.1 Teoria della frattura di Griffith e Irwin

Griffith formulò una nuova teoria della meccanica della frattura. Il suo lavoro nasce dall'osservazione che la resistenza meccanica nei materiali è minore rispetto a quella che teoricamente dovrebbe servire per vincere la coesione molecolare. Si tratta di una differenza considerevole, da 100 a 1000 volte più piccola. La discrepanza venne attribuita, da Griffith, ai difetti nel materiale, nei quali si possono concentrare le tensioni locali. Quando una fessura supera la sua lunghezza critica, si propaga in modo instabile portando al collasso strutturale. Lo studio teorico cercò di fornire risposte utili per la progettazione dei materiali.

Griffith, nel 1921, studiò la propagazione delle crepe nel vetro, e scoprì che vi erano molte crepe microscopiche. Queste crepe erano presenti anche in altri materiali. Gli fu chiaro che avrebbero ridotto la resistenza massima del materiale, perché luoghi di concentrazione delle tensioni. Altri esperimenti gli suggerirono che lo stress provocato da una frattura aumenta con la diminuzione del diametro della fessura.
Griffith, per analizzare il fenomeno della frattura, introdusse considerazioni energetiche e non solo tensionali.
Egli dimostrò che l'energia elastica di deformazione, W_e , rilasciata da una lastra uniformemente tesa di spessore unitario quando questa viene incisa da una fessura di lunghezza $2a$, e gli spostamenti all'infinito sono mantenuti costanti, risulta proporzionale all'energia contenuta nel cerchio di raggio a prima dell'incisione, W_s.

Energia elastica di deformazione: $W_e = \pi \cdot a^2 \frac{\sigma^2}{E}$

Per realizzare una fessura di lunghezza $2a$ è necessaria un'energia superficiale pari a:

$$W_s = 4 \cdot a \cdot \gamma$$

dove γ è l'energia riferita all'unità di superficie.

Griffith andò a considerare ciò che succede quando vi è una propagazione virtuale della fessura di lunghezza da, quindi andando a considerare il differenziale di queste due grandezze.
La frattura da virtuale diventa reale quando la variazione differenziale

dell'energia rilasciata è maggiore o uguale alla derivata dell'energia dissipata, cioè quella richiesta dalla nuova porzione di superficie libera che si crea, ovvero:

$$\frac{dW_e}{da} \geq \frac{dW_s}{da}$$

Da qui si può ricavare la condizione di instabilità:

$$2\pi a \frac{\sigma^2}{E} \geq 4\gamma$$

Esplicitando questa relazione rispetto alla tensione applicata si ottiene:

$$\sigma \geq \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi a}}$$

Il doppio dell'energia superficiale viene chiamata Energia di Frattura, G_{IC}, la relazione diventa:

$$\sigma \geq \sqrt{\frac{G_{IC} E}{\pi a}}$$

Si può definire una lunghezza, a_0, tale per cui le fessure, con lunghezze maggiori di questa, diventano pericolose.

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{G_{IC} \cdot E}{\sigma_p^2}$$

a_0: semi-lunghezza critica

Se σ_p è molto alta questo vuol dire che a_0 diventa sempre più piccola, quindi: un materiale con resistenza molto alta è anche molto sensibile alla presenza di fessure.
Irwin riprese il discorso energetico di Griffith.
Per il principio di conservazione dell'energia deve valere il seguente bilancio tra la variazione di energia potenziale totale, dW, e l'energia di frattura, $4\gamma da$:

$$dW + 4 \cdot \gamma \cdot da = 0$$

dW: variazione dell'energia potenziale totale negativa
$4\gamma dA$: energia dissipata positiva

Sapendo che:

$$\gamma = \frac{G_{IC}}{2}$$

dove γ è l'energia superficiale specifica cioè l'energia necessaria a rompere i legami chimici e atomici che connettono due superfici unitarie e contigue della materia.
Considerando anche propagazioni virtuali, e non solo reali della fessura, si definisce il concetto di Forza generalizzata di propagazione della fessura, G_I:

$$dW + 4 \cdot \gamma \cdot da = 0$$

$$dW + 4 \cdot \frac{G_I}{2} \cdot da = 0$$

$$dW + G_I \cdot dA = 0$$

$dA = 2da$: superficie incrementale di frattura.

Il parametro si definisce quindi come l'energia potenziale totale rilasciata per incremento unitario di area di frattura:

$$G_I = -\frac{dW}{dA}$$

La propagazione fragile della fessura avviene realmente quando G_I eguaglia il suo valore critico:

$$G_I = G_{IC}$$

Poiché il campo tensionale nelle vicinanze dell'estremità della fessura è univocamente definito dal fattore K_I, è lecito assumere che la propagazione instabile della fessura avviene quando K_I raggiunge il suo valore critico:

$$K_I = K_{IC}$$

I due valori critici, della variazione di energia potenziale totale (energia di frattura) e del fattore di intensificazione degli sforzi, non sono indipendenti ma sono legati da una relazione.

Secondo Griffith la condizione di instabilità è data da:

$$\sigma \geq \sqrt{\frac{G_{IC} \cdot E}{\pi \cdot a}}$$

Mentre secondo Irwin, tenendo conto da Westergaard che:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Si ha:

$$\sigma \geq \frac{K_{IC}}{\sqrt{\pi \cdot a}}$$

Poiché entrambe le condizioni riguardano lo stesso problema fisico e presentano entrambe la semi-lunghezza della fessura, a, elevata all'esponente $-1/2$, si può ottenere:

$$K_{IC} = \sqrt{G_{IC}.E}$$

I due valori critici sono dunque in relazione tramite il modulo elastico, E, del materiale.
Si può osservare come tale relazione riguardi solo i valori critici del fattore di intensificazione degli sforzi e della forza generalizzata di propagazione

della fessura.
Si può estendere anche ai valori generici dei due parametri tramite una dimostrazione di Irwin. Si ottiene:

$$G_I = \frac{{K_I}^2}{E}$$

Infine, si può scrivere:

$$G = \frac{{K_I}^2}{E} + \frac{{K_{II}}^2}{E}$$

G rappresenta la variazione dell'energia potenziale totale per estensione virtuale della fessura. Infatti, quando è sollecitata in modo misto, una fessura non si estende in maniera collineare a se stessa ma in realtà dirama.

6. ATTIVITA' SPERIMENTALE

6.1 Introduzione

Durante l'attività di laboratorio, l'attenzione è stata focalizzata sull'uso del Bio-char, il sottoprodotto solido che deriva dalla pirolisi della biomassa e che potrebbe essere utilizzato come inerte verde in compositi a base cementizia, con l'obiettivo di rendere più sostenibile il processo produttivo dei materiali da costruzione tradizionali.

In particolare, sono state aggiunte le micro particelle pirolizzate in diverse percentuali rispetto al peso del cemento, al fine di migliorarne le proprietà meccaniche e a contribuire alla produzione di materiali da costruzione più sostenibili, portando ad una riduzione delle emissioni di CO_2 nell'atmosfera.

Tali particelle sono rifiuti e rappresentano il sottoprodotto solido di un processo che non riguarda la tecnologia del calcestruzzo bensì il recupero di energia da biomassa. Proprio per questi motivi, i risultati ottenuti sono promettenti anche dal punto di vista della sostenibilità ambientale.

Per questo scopo, dunque, il Bio-char è stato macinato finemente fino a raggiungere la granulometria desiderata presso il Dipartimento di Scienze Applicate del Politecnico di Torino ed è stato possibile normalizzare le modalità di utilizzo del Bio-char al fine di garantire la ripetibilità delle miscele di cemento.

Successivamente è stata svolta l'analisi FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) sul Bio-char utilizzato nei provini sperimentali, e da questa è risultato che le particelle hanno una forma molto irregolare e quindi forniscono una buona adesione alla pasta di cemento.

Nel lavoro precedente (Restuccia, 2016), invece, è stato utilizzato un materiale auto-prodotto mediante il processo di pirolisi su rifiuti agro-alimentari, quali gusci di nocciole e polvere di caffè.
Dai risultati delle prove meccaniche ottenuti da questo lavoro si evince un promettente miglioramento della resistenza, della tenacità e della duttilità. Pertanto, ciò giustifica l'aumento della superficie di frattura e di conseguenza dell'energia di frattura.

6.2 Materiali e Metodi

Nel corso dell'attività sperimentale sono stati preparati, presso il laboratorio MASTR-LAB del Politecnico di Torino, diversi provini di pasta cementizia senza e con l'aggiunta di Bio-char in diverse percentuali rispetto al peso del cemento. I provini sono stati in seguito sottoposti alla prova meccanica di resistenza a flessione al fine di evidenziare le differenze tra i provini in termini di resistenza, tenacità e duttilità.
Per la preparazione degli impasti cementizi sono stati utilizzati i seguenti materiali:

- Cemento: CEM I 52,5 R prodotto dalla Ciments Vigier SA con marcatura CE secondo il regolamento n°305/2011 e conforme alla norma armonizzata UNI EN 197-1. La composizione e i requisiti fisici, meccanici e chimici sono riportati in Tabella 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3.

Tipo di cemento	Designazione	Notazione	Clinker di cemento Portland	Costituenti secondari
CEM I	Ciment Portland	CEM I	95-100%	0-5%

Tabella 6.2.1. Composizione cemento

Classe di resistenza	Resistenza a compressione (MPa)			Tempo di inizio presa (min)	Stabilità (mm)
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata		
	2 gg	7 gg	28 gg		
52,5 R	≥ 30	-	≥ 52,5	≥ 45	≤ 10

Tabella 6.2.2. Requisiti meccanici e fisici definiti come valori caratteristici

(dal prospetto 2 UNI EN 197-1)

Proprietà	Requisiti	Valori indicativi Vigier
Tenore in solfato	≤ 4,0 %	<3%
Tenore in cloruro	≤ 0,10 %	<0,06 %

Tabella 6.2.3. Requisiti chimici definiti come valori caratteristici

(dal prospetto 3 UNI EN 197-1)

- Acqua: acqua deionizzata

- Superfluidificante: Isoflow6600 Cemex, dosato all'1% sul peso del cemento con caratteristiche riportate in Tabella 6.2.4.

Caratteristiche	Valore	Norma
Forma	liquida	
Colore	marrone chiaro	
pH (a 20 °C)	6,1 ± 1	ISO 4316
Temperatura di ebollizione	100 °C	
Densità (a 20 °C)	1,08 ± 0,02 g/cm^3	ISO 758
Solubilità	solubile in acqua	

Tabella 6.2.4. Caratteristiche additivo isoflow 6600 Cemex.

- Biochar: tipo Myschantus, MSC, e tipo Softwood, SWC.
  I due tipi differiscono principalmente per il contenuto in percentuale di carbonio, entrambi pirolizzati alla temperatura di 700°C, in aggiunta allo 0,8%, all'1% rispetto al peso del cemento.
  Le principali caratteristiche e il report di tossicità sono riportate nelle tabelle seguenti (Tabelle 6.2.5, 6.2.6, 6.2.7, 6.2.8, 6.2.9, 6.2.10).

Caratteristiche principali	Unità di misura	Valore
Umidità	Peso %	1,00
C_{tot}	Peso %	90,21
H	Peso %	1,83
O	Peso %	6,02
H:C_{tot}	Rapporto molare	0,24
O:C_{tot}	Rapporto molare	0,05
Polvere tot	Peso %	1,89
N tot	Peso %	< 0,01
pH	-	8,44
Conduttività elettrica	dS/m	0,16
Stabilità C Biochar	% C-base	97,27

Figura 6.2.5. Caratteristiche principali SWC

Tossicità-Contenuto Totale	Unità di misura	Valore
Idrocarburi Policiclici Aromatici (EPA16)	mg/kg peso secco	0,18
Diossina/Furani (PCDD/Fs)	ng/kg peso secco	3,30
Policlorobifenili (PCBs)	ng/kg peso secco	0,17
As	mg/kg peso secco	0,61
Cd	mg/kg peso secco	8,16
Cr	mg/kg peso secco	123,35
Co	mg/kg peso secco	4,37
Cu	mg/kg peso secco	9,66
Pb	mg/kg peso secco	< valori limiti
Hg	mg/kg peso secco	< valori limiti
Mo	% C-base	38,54
Ni	mg/kg peso secco	74,07
Se	mg/kg peso secco	< valori limiti
Zn	mg/kg peso secco	99,60

Figura 6.2.6. Report Tossicità SWC

Caratteristiche principali	Unità di misura	Valore
Umidità	Peso %	2,23
C_{tot}	Peso %	79,18
H	Peso %	1,26
O	Peso %	6,99
H:C_{tot}	Rapporto molare	0,19
O:C_{tot}	Rapporto molare	0,07
Polvere totale	Peso %	11,55
N totale	Peso %	1,03
pH	-	9,72
Conduttività elettrica	dS/m	1,91
Stabilità C Biochar	% C-base	98,93

Figura 6.2.7. Caratteristiche principali MSC

Tossicità-Contenuto Totale	Unità di misura	Valore
Idrocarburi Policiclici Aromatici (EPA16)	mg/kg peso secco	0,18
Diossina/Furani (PCDD/Fs)	ng/kg peso secco	3,30
Policlorobifenili (PCBs)	ng/kg peso secco	0,17
As	mg/kg peso secco	0,61
Cd	mg/kg peso secco	8,16
Cr	mg/kg peso secco	123,35
Co	mg/kg peso secco	4,37
Cu	mg/kg peso secco	9,66
Pb	mg/kg peso secco	< valori limiti
Hg	mg/kg peso secco	< valori limiti
Mo	% C-base	38,54
Ni	mg/kg peso secco	74,07
Se	mg/kg peso secco	< valori limiti
Zn	mg/kg peso secco	99,60

Figura 6.2.8. Report Tossicità MSC

Figura 6.2.9. Bio-char pirolizzato alla T= 700 °C

Il Bio-char, precedentemente frantumato e setacciato al setaccio da 125 µm, è stato introdotto all'interno del mulino a sfere planetario pluripostazione *Pulverisette 5* della *Fritsch* a disposizione del Dipartimento di Scienze Applicate del Politecnico di Torino e sottoposto quindi, per cinque ore, all'operazione di macinazione.

Figura 6.2.10. Mulino Pulverisette 5 Fritsch

Per tale operazione, le sferette e il campione, in soluzione con etanolo, sono stati posti all'interno di una giara dotata di una rotazione su se stessa e di una rotazione intorno ad un asse generando così il moto di rivoluzione planetaria che comporta un movimento particolare delle sferette e del campione all'interno della giara, favorendo così un grandissimo numero di urti e consentendo una rapidissima macinazione**.**

Figura 6.2.11. Misura quantitativo Bio-char

Figura 6.2.12. Giara con sferette

Figura 6.2.13. Bio-char in soluzione con etanolo

Ad avvenuta macinazione, è stata effettuata l'analisi granulometrica sul Bio-char, mediante il granulometro laser *Analysette 22 compact* della *Fritsch.*

A tale scopo, è stata riempita la cella portacampione col liquido di sospensione, azionando manualmente l'agitazione ed eseguendo una misura del bianco di riferimento.

Dopodiché si è introdotto il campione nella cella portacampione a piccole riprese mediante una pipetta fino ad una percentuale di diluizione del campione compresa tra il 7%-15%.

Le diverse misure ottenute permettono di stabilire una procedura standard per l'utilizzo del Bio-char al fine di garantire la ripetibilità delle miscele di cemento.

Figura 6.2.14. Prelievo Bio-char per analisi granulometrica

Figura 6.2.15. Cella portacampione

Nella seguente Tabella (Tab. 6.2.16) si riporta un esempio di analisi granulometrica del Bio-char con la relativa curva (Fig. 6.2.17):

Class Low	Size	Class High	Frequ.	Cum. Frequ.
0,29	0,31	0,33	0,14	0,14
0,33	0,35	0,37	0,16	0,30
0,37	0,39	0,41	0,20	0,51
0,41	0,44	0,46	0,30	0,81
0,46	0,49	0,51	0,45	1,26
0,51	0,54	0,57	0,65	1,90
0,57	0,61	0,64	0,89	2,80
0,64	0,68	0,72	1,17	3,97
0,72	0,76	0,80	1,48	5,45
0,80	0,85	0,89	1,80	7,24
0,89	0,95	1,00	2,12	9,37
1,00	1,06	1,11	2,46	11,83
1,11	1,18	1,25	2,82	14,65
1,25	1,32	1,39	3,19	17,84
1,39	1,47	1,55	3,56	21,40
1,55	1,65	1,74	3,92	25,32
1,74	1,84	1,94	4,27	29,59
1,94	2,05	2,17	4,58	34,17
2,17	2,30	2,42	4,87	39,04
2,42	2,56	2,71	5,15	44,19
2,71	2,86	3,02	5,42	49,61
3,02	3,20	3,38	5,70	55,30
3,38	3,58	3,77	5,97	61,28
3,77	4,00	4,22	6,20	67,47
4,22	4,46	4,71	6,28	73,75
4,71	4,99	5,26	6,11	79,87
5,26	5,57	5,88	5,63	85,50
5,88	6,23	6,57	4,82	90,32
6,57	6,96	7,34	3,79	94,11

7,34	7,77	8,20	2,70	96,80
8,20	8,68	9,16	1,72	98,52
9,16	9,70	10,24	0,96	99,48
10,24	10,84	11,44	0,45	99,93
11,44	12,11	12,78	0,07	100,00
12,78	13,53	14,28	0,00	100,00
14,28	15,11	15,95	0,00	100,00
15,95	16,89	17,82	0,00	100,00
17,82	18,87	19,91	0,00	100,00
19,91	21,08	22,25	0,00	100,00
22,25	23,55	24,86	0,00	100,00
24,86	26,31	27,77	0,00	100,00
27,77	29,40	31,03	0,00	100,00
31,03	32,85	34,66	0,00	100,00
34,66	36,70	38,73	0,00	100,00
38,73	41,00	43,27	0,00	100,00
43,27	45,81	48,34	0,00	100,00
48,34	51,18	54,01	0,00	100,00
54,01	57,18	60,35	0,00	100,00
60,35	63,88	67,42	0,00	100,00
67,42	71,37	75,33	0,00	100,00
75,33	79,74	84,16	0,00	100,00
84,16	89,09	94,03	0,00	100,00
94,03	99,54	105,05	0,00	100,00
105,05	111,21	117,37	0,00	100,00
117,37	124,25	131,13	0,00	100,00
131,13	138,82	146,51	0,00	100,00
146,51	155,10	163,69	0,00	100,00
163,69	173,29	182,88	0,00	100,00
182,88	193,60	204,33	0,00	100,00
204,33	216,31	228,29	0,00	100,00
228,29	241,67	255,05	0,00	100,00
255,05	270,01	284,96	0,00	100,00

Tabella 6.2.16 Analisi granulometrica Bio-char

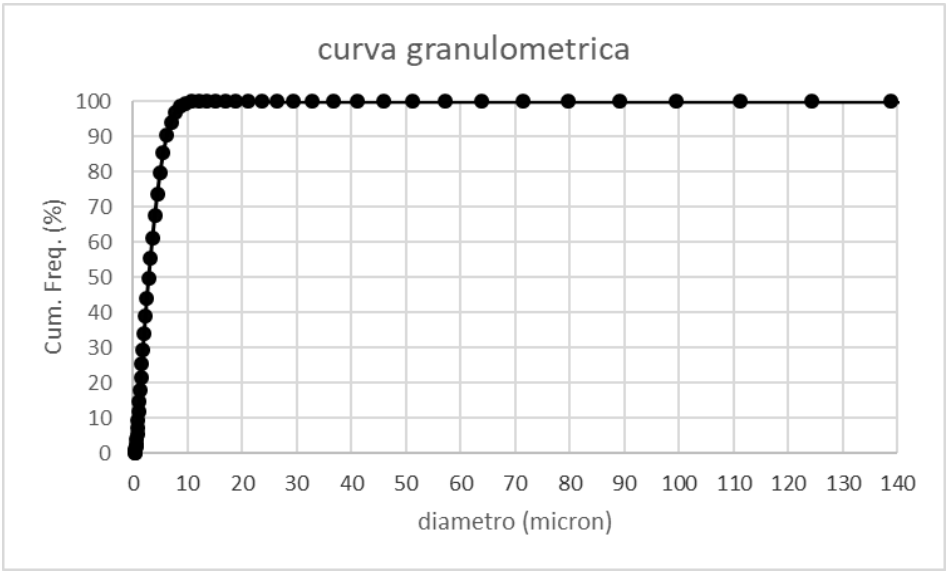


Figura 6.2.17. Curva granulometrica Bio-char

È stato possibile ottenere circa la stessa granulometria per i differenti campioni di Bio-char utilizzando una procedura standard durante l'attività sperimentale garantendo la ripetibilità delle miscele di cemento.

La soluzione di Bio-char in etanolo è stata posta nel forno per alcuni giorni al fine di essiccare il materiale e, successivamente, polverizzarlo così da renderlo pronto per gli impasti cementizi.
Attraverso il microscopio elettronico a scansione con sorgente a emissione di campo (Field Emission - Scanning Electron Microscope, FE-SEM) si è potuto caratterizzare il materiale con risoluzione intorno al nanometro; di seguito sono riportate le immagini ottenute (Fig. 6.2.18 e 6.2.19) in cui si evidenzia come le particelle risultino irregolari e frastagliate a vantaggio di una migliore adesione alla pasta di cemento.

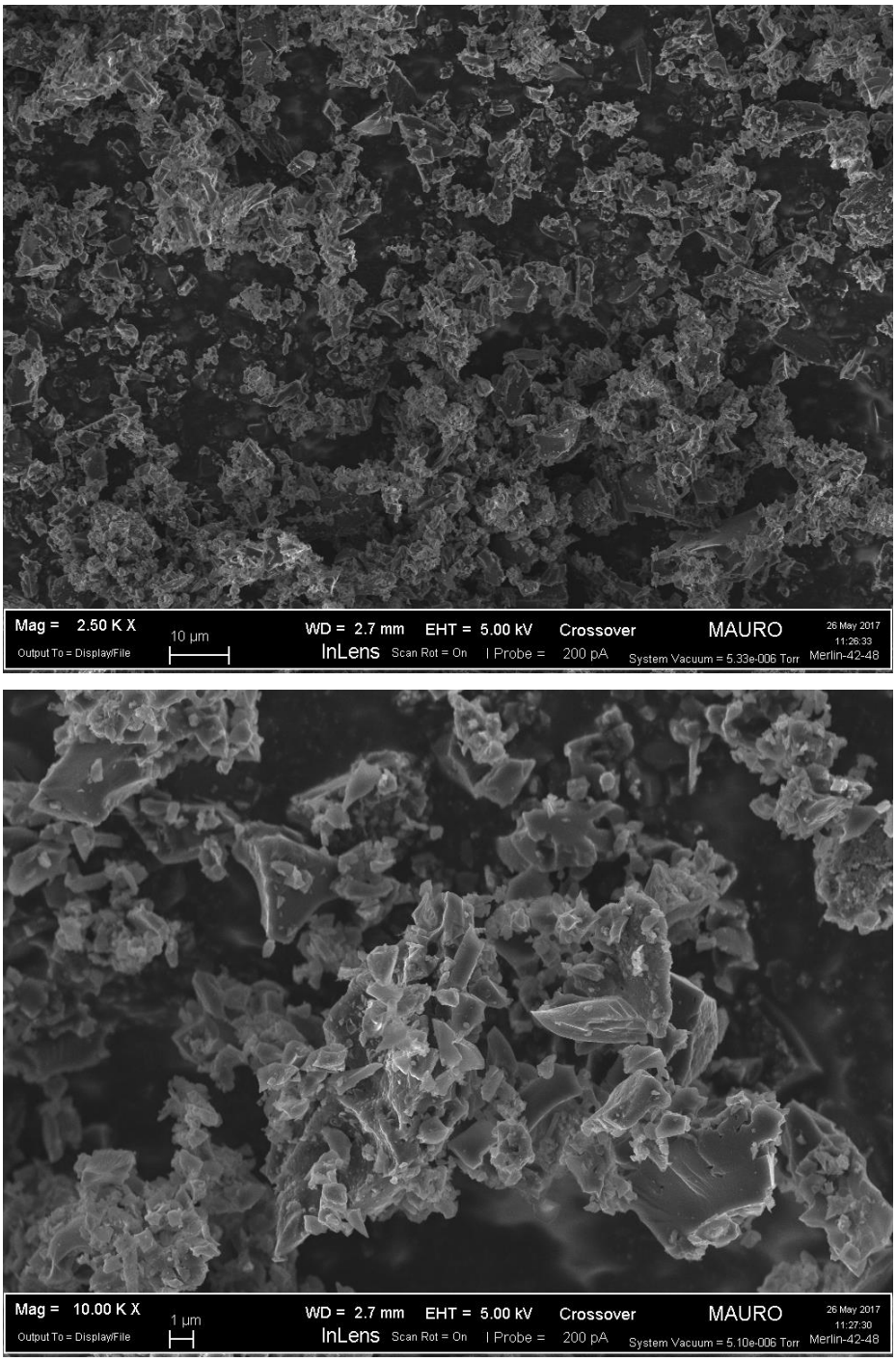


Figura 6.2.18: a) FE-SEM scala 10 µm ; b) FE-SEM scala 1 µm

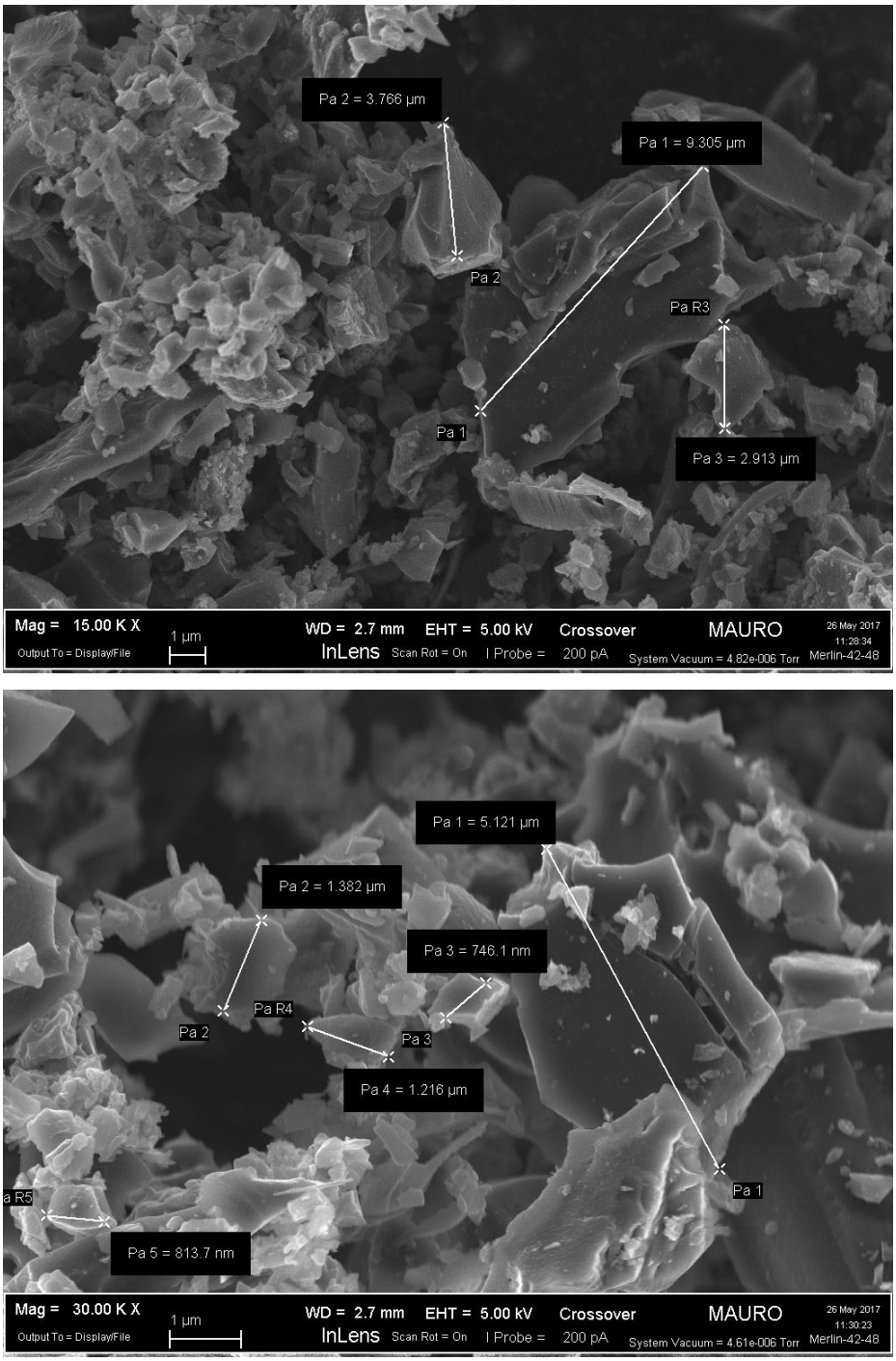


Figura 6.2.19: a) FE-SEM scala 10 µm con misure; b) FE-SEM scala 1 µm con misure

Le ricette utilizzate per la preparazione degli impasti cementizi sono riportate qui di seguito:

RICETTA N°1 (senza Bio-char):

CEMENTO	230 grammi
ACQUA	80,5 grammi
ADDITIVO 1%	2,3 grammi
A/C	0,35

RICETTA N°2 (con Bio-char all'1%):

CEMENTO	230 grammi
ACQUA	80,5 grammi
ADDITIVO 1 %	2,3 grammi
BIO-CHAR 1 %	2,3 grammi
A/C	0,35

RICETTA N°3 (con Bio-char allo 0,8%):

CEMENTO	230 grammi
ACQUA	80,5 grammi
ADDITIVO 1 %	2,3 grammi
BIO-CHAR 0,8 %	1,84 grammi
A/C	0,35

I materiali utilizzati per gli impasti cementizi sono stati pesati su bilancia tecnica di laboratorio (Fig. 6.2.20) con azzeramento tara e con precisione fino al decimo di mg.

Figura 6.2.20 Bilancia tecnica di laboratorio

Il laboratorio MASTR-LAB del Politecnico di Torino, nel quale è avvenuta la preparazione dei provini, è mantenuto alla temperatura di (20 ± 2) °C con umidità relativa non minore del 50%.

I materiali quali acqua, superfluidificante e bio-char in polvere (Fig. 6.2.21) sono stati pesati e miscelati insieme all'interno di un becher di plastica, immerso successivamente in un bagno ultrasonico per una durata di 10 minuti al fine di consentire una buona miscelazione ed omogeneizzazione del composto.

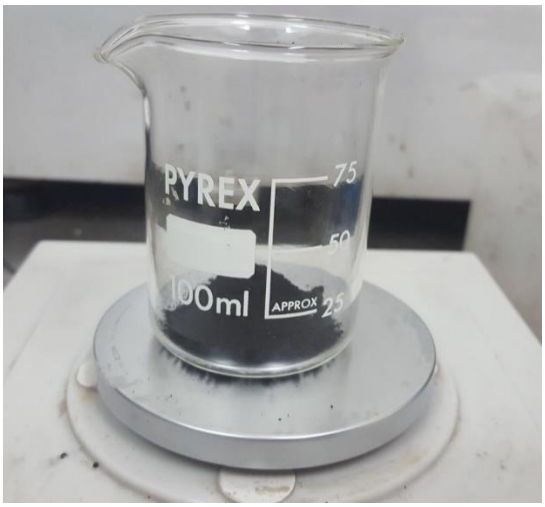


Figura 6.2.21. Misura Bio-char su bilancia

Successivamente, in modo graduale, è stato introdotto il cemento e il tutto è stato sottoposto a miscelazione meccanica tramite un agitatore verticale ad asta con elica di acciaio a quattro ali con un motore diretto con variazione di velocità (Fig. 6.2.22), avendo cura che il composto rimanesse fluido ed omogeneo.

Entro il primo minuto di miscelazione è stata versata tutta la quantità di cemento con una velocità moderata del motore, dopodiché, nel secondo minuto, la miscelazione è proseguita mantenendo la stessa velocità, mentre nel terzo e nel quarto minuto di mescolazione la velocità di miscelazione è stata leggermente aumentata.

Figura 6.2.22 Agitatore verticale ad asta con elica

Al termine della fase di miscelazione, l'impasto cementizio è stato versato lentamente all'interno della cassaforma in acciaio per evitare inglobamento d'aria (Fig.6.2.23).

Figura 6.2.23. Getto impasto in cassaforma

Successivamente, i provini sono stati conservati all'interno di questi stampi in atmosfera umida per almeno 24 h e, una volta sformati, sono stati immersi nell'acqua fino al momento delle prove di resistenza a 7 e a 28 giorni.
Il locale ad aria umida per la conservazione dei provini nello stampo è mantenuto alla temperatura di (20 ± 1) °C con umidità relativa non minore del 90 %. La temperatura dell'acqua è mantenuta a (20,0 ± 1) °C.
Lo stampo utilizzato è formato da quattro scomparti orizzontali in modo da consentire la preparazione contemporanea di quattro provini prismatici avente sezione di 20 mm x 20 mm e lunghezza di 80 mm.

Prima di eseguire la prova a flessione su tre punti, i provini sono stati intagliati mediante una troncatrice metallografica, *TR 100 S Remet*, (Fig.6.2.24) a disposizione del DISAT, realizzando un intaglio di 0,6 mm nella mezzeria della faccia del provino ortogonale alla superficie di getto.

Figura 6.2.24. Troncatrice metallografica TR 100 S Remet

6.3 Prove

Per ogni provino sperimentale intagliato è stata eseguita una prova a flessione su tre punti mediante l'utilizzo della macchina a singola colonna Zwick-Line Z010, a controllo di spostamento, con una cella di carico da 1 kN (Fig.6.3.1 e Fig. 6.3.2).

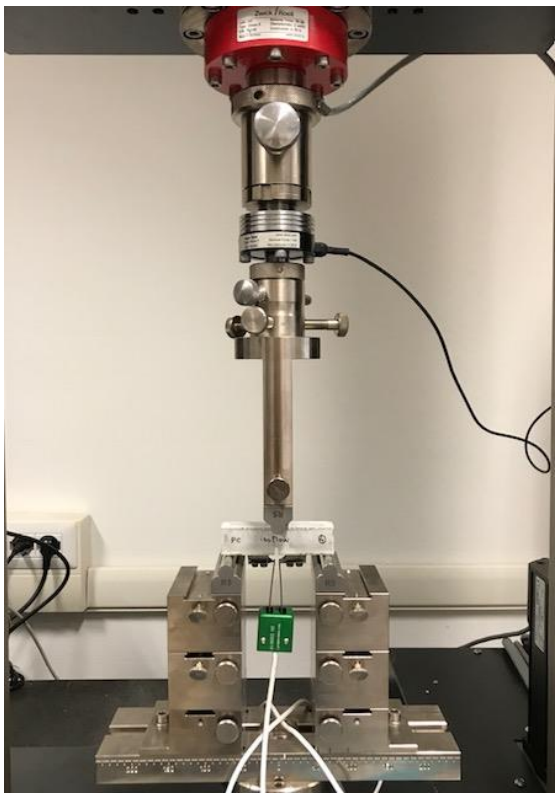


Figura 6.3.1. Prova di flessione su tre punti

La prova è stata svolta controllando l'apertura dell'intaglio (Crack Mouth Opening Displacement, CMOD) mediante un estensimetro; la velocità di prova è stata impostata a 0,005 mm/min, mentre si è scelta una distanza tra gli appoggi del provino pari a 70 mm.

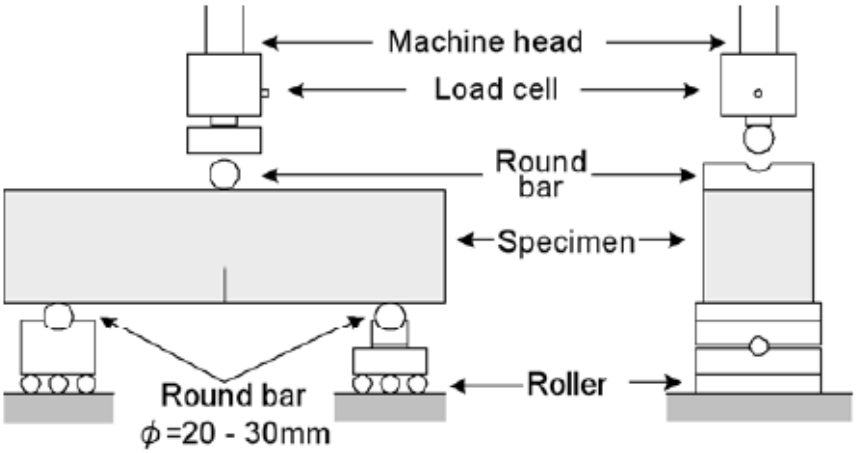


Figura 6.3.2. Schema apparecchiatura di carico

Per valutare la resistenza a flessione dei provini, aventi un volume di 20x20x80 mm^3, si è calcolato il Modulo di Rottura (Modulus Of Rupture, MOR), cioè il massino stress della fibra a rottura:

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

in cui:

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

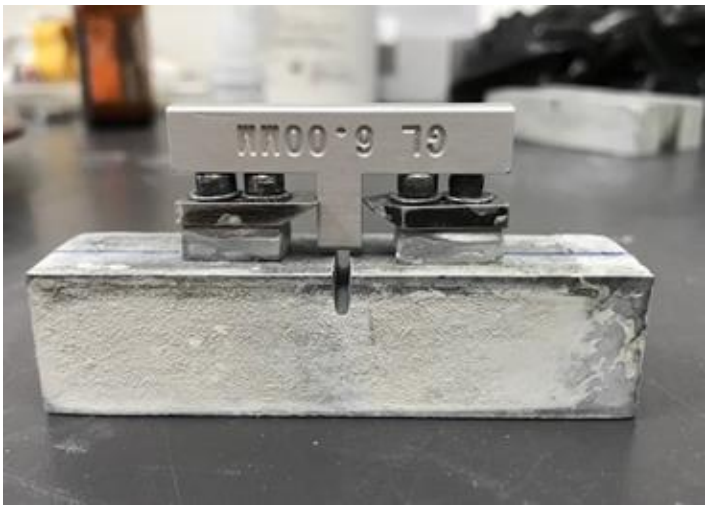


Figura 6.3.3 Equipaggiamento per predisposizione estensimetro

Prima dell'esecuzione della prova, ogni provino è stato pesato, successivamente si è provveduto ad applicare con della resina due basette e due coltellini sulla superficie dello stesso, per la predisposizione dell'estensimetro (Fig. 6.3.3).

Dopodiché, il provino è stato alloggiato all'interno della macchina di prova, con l'intaglio rivolto verso il basso e quindi sottoposto alla prova precedentemente descritta.

A partire da questi risultati è stato possibile determinare alcuni parametri meccanici dei provini sperimentali.

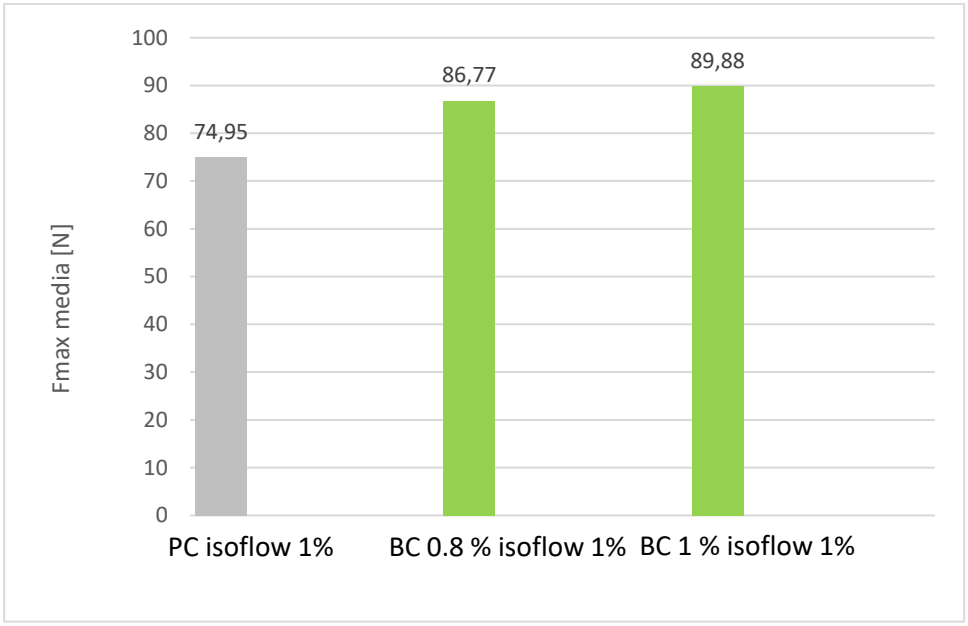


Figura 6.3.4. Prova a flessione su tre punti a 7 giorni

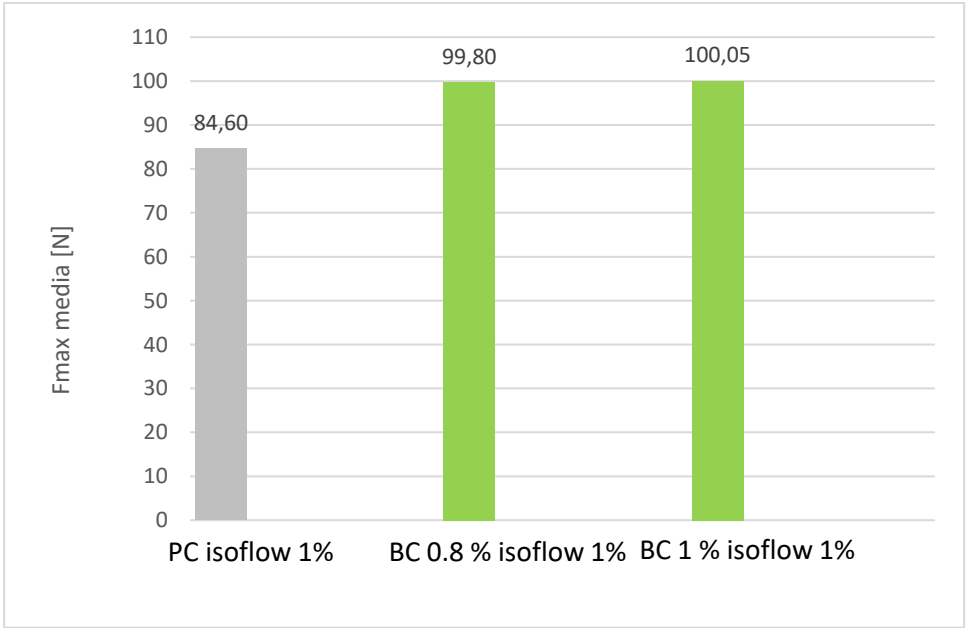


Figura 6.3.5. Prova a flessione su tre punti a 28 giorni

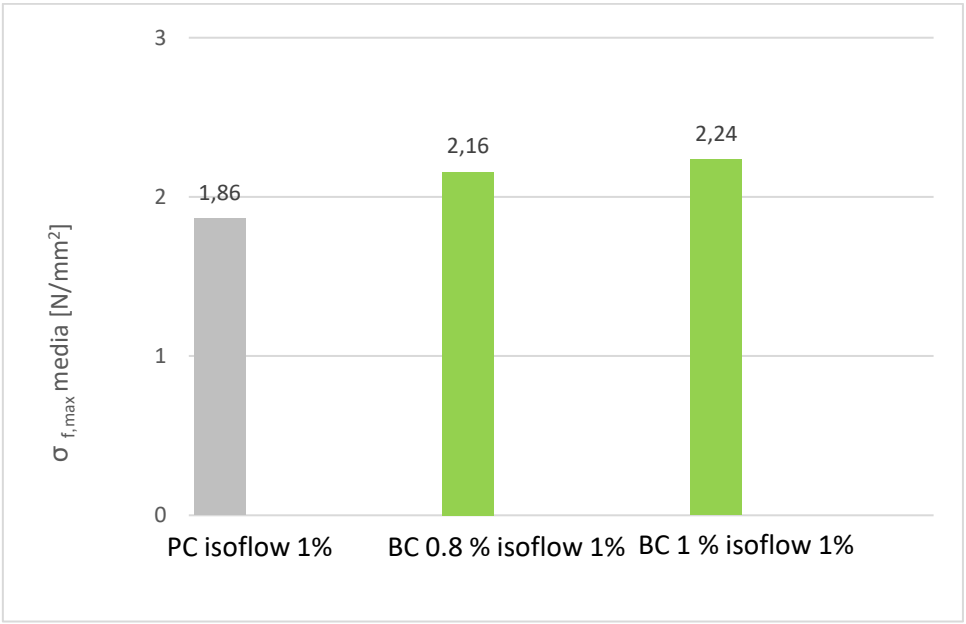


Figura 6.3.5. Modulo di Rottura a 7 giorni

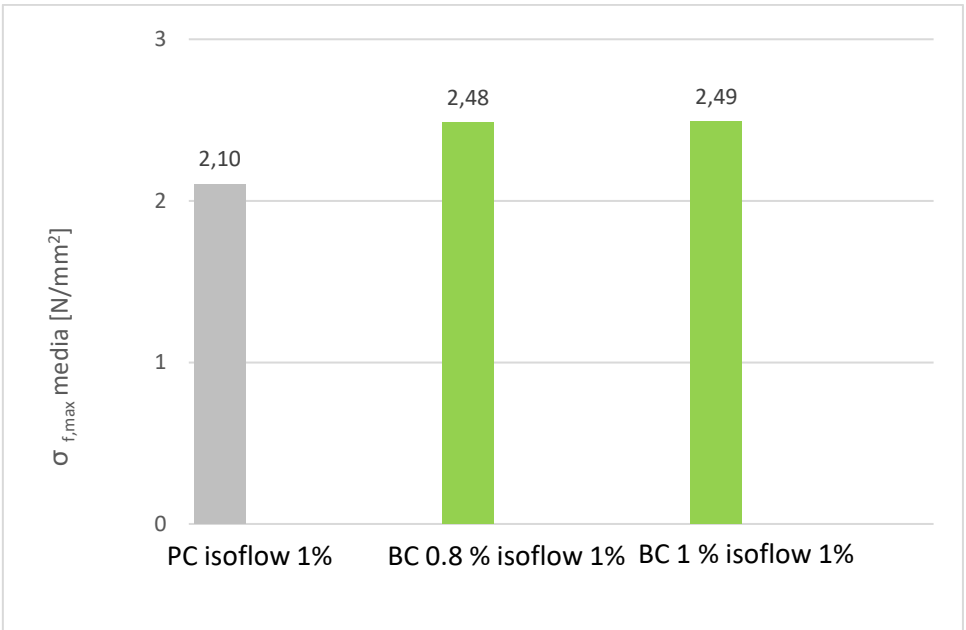


Figura 6.3.6. Modulo di Rottura a 28 giorni

Il documento Japan Concrete Institute Standard, JCI-S-001 standard, (Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam) descrive un metodo per determinare l'energia di frattura, G_F, a partire dalla prova di flessione su tre punti in quanto risulta molto più agevole realizzare questo tipo di prova per campioni quasi fragili rispetto a prove di trazione uniassiale.

L'energia di frattura, G_F, misura la quantità di energia assorbita fino a quando il campione subisce la rottura in due parti.

Nel JCI-S-001 standard sono riportate alcune raccomandazioni elencate qui di seguito.

I provini innanzitutto devono essere prismatici con sezione rettangolare e devono presentare un intaglio in mezzeria di altezza pari a 0,3 volte l'altezza del provino.

Nello specifico:

1. L'altezza del provino (D) non deve essere inferiore a 4 volte la massima dimensione dell'aggregato;
2. La larghezza del provino (B) non deve essere inferiore a 4 volte la massima dimensione dell'aggregato;
3. La distanza tra gli appoggi (S) deve essere pari a 3D, mentre la lunghezza del provino (L) non deve essere inferiore a 3,5D;
4. L'altezza (a_0) e l'apertura (n_0) dell'intaglio devono essere rispettivamente 0,3D e non superiore a 5 mm.

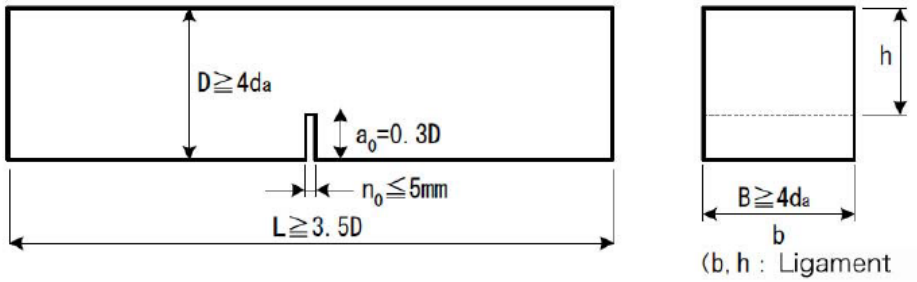


Figura 6.3.8. Dimensioni provino da JCI-S-001 standard

L'apertura della frattura CMOD e il carico corrispondente F sono registrati finché il provino fessurato non si rompe per effetto del peso proprio. Oltre al carico misurato, è necessario valutare il peso del provino e parte dell'attrezzatura agente su di esso.

L'energia di frattura può essere calcolata con le seguenti espressioni:

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

dove:

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

G_F = energia di frattura (N/mm)

W_0 = area sottesa alla curva F-CMOD fino al punto di rottura del provino (N mm)

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

A_{lig} = area della sezione senza l'area di intaglio (bxh) (mm^2)

m_1 = massa del provino (kg)

S = lunghezza cella di carico (mm)

L = lunghezza del campione (mm)

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

g = accelerazione di gravità (9,81 m/s^2)

CMODc = CMOD all'istante della rottura (mm)

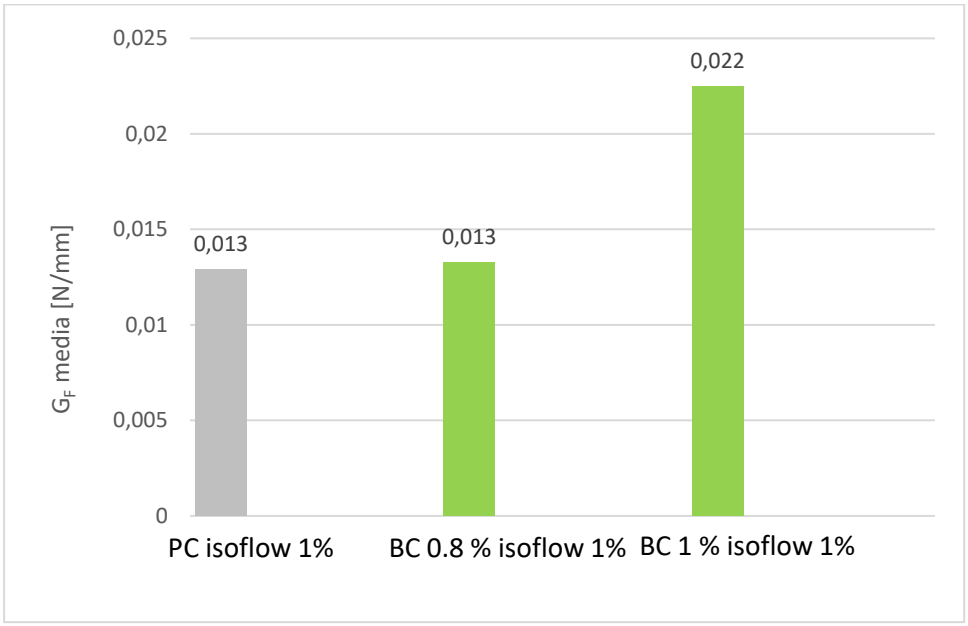


Figura 6.3.7. Energia di frattura a 7 giorni secondo JCI – S - 001 standard

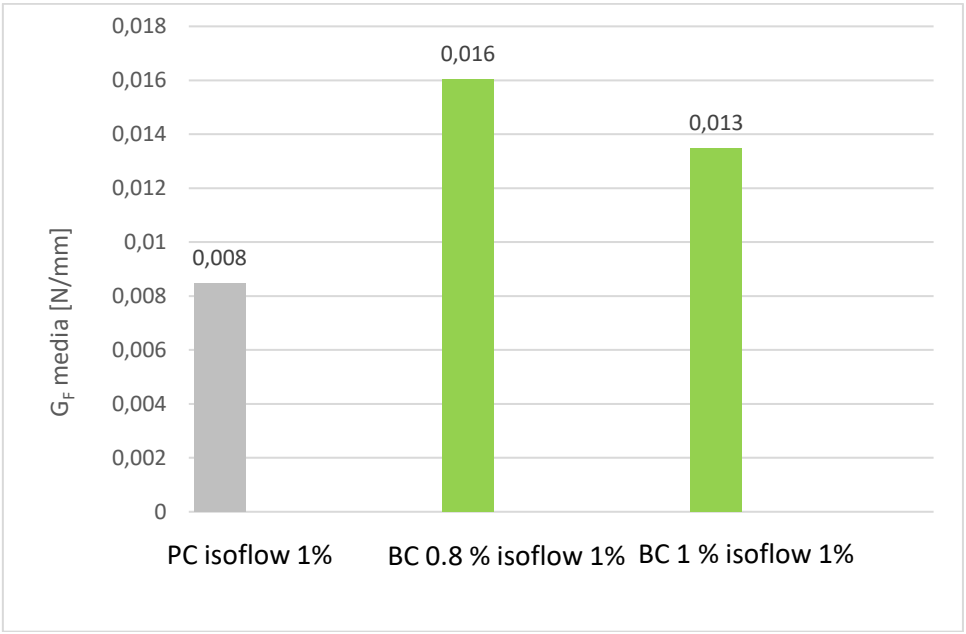


Figura 6.3.8. Energia di frattura a 28 giorni secondo JCI – S - 001 standard

6.4 Risultati

I vari provini sperimentali, realizzati mediante l'aggiunta di nano / micro particelle di Bio-char all'interno della pasta cementizia, sono stati sottoposti alla prova di flessione su tre punti in controllo di apertura della fessura a 7 e a 28 giorni.

I risultati ottenuti sono stati elaborati con strumenti statistici, in particolare sono stati calcolati il valor medio e la deviazione standard della forza massima, del modulo di rottura e dell'energia di frattura.

Dai dati delle prove si può notare una dispersione che ne ha reso difficoltosa l'interpretazione. Tuttavia, i provini privi di Bio-char sono caratterizzati da una deviazione standard molto bassa, quindi il materiale pirolizzato ha prodotto un chiaro effetto sull'aumento della imprevedibilità dei risultati. Ciò è probabilmente dovuto ai problemi riscontrati in fase di preparazione degli impasti, ovvero alla non uniforme dispersione delle nano / micro particelle all'interno della pasta cementizia.

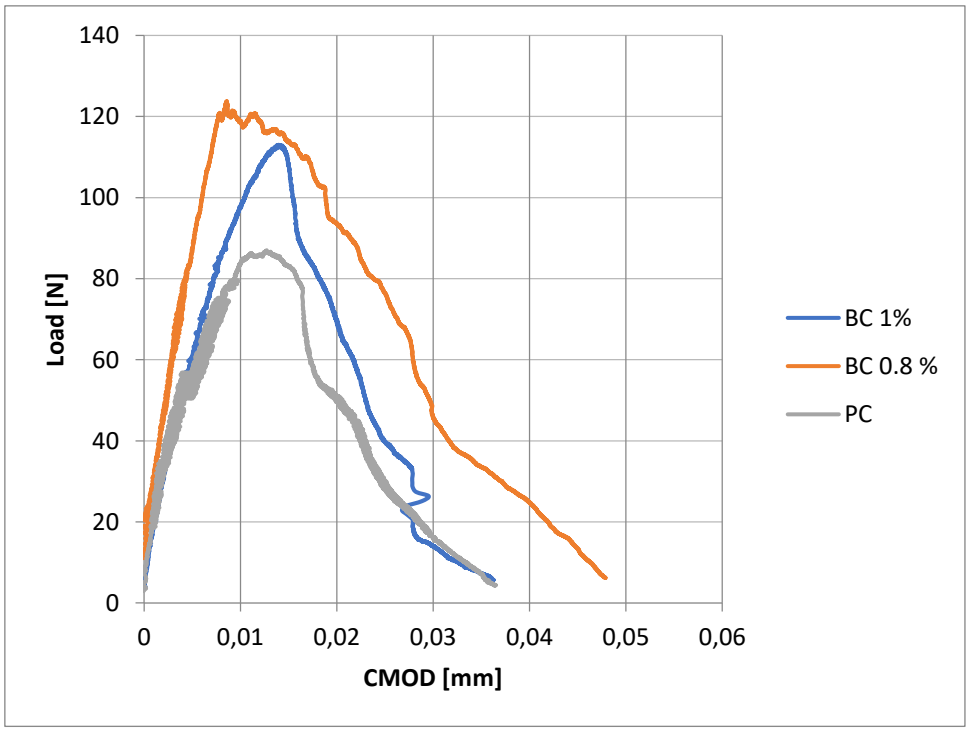
Tuttavia le Figure 6.3.4 e 6.3.5 mettono in evidenza che i campioni caratterizzati dalle aggiunte di Bio-char hanno una maggiore resistenza a flessione, sia a 7 che a 28 giorni, rispetto ai campioni privi di queste; tale incremento risulta essere pari a circa il 20 %. Inoltre, non si è riscontrata una sostanziale differenza in termini di resistenza al variare delle due percentuali di aggiunta utilizzate. Anche il modulo di rottura mostra questo andamento.

A partire dalle prove di flessione su tre punti è stato possibile studiare l'energia di frattura G_F dei campioni sperimentali e, si è osservato come questa aumenti leggermente con l'introduzione del Bio-char nella pasta cementizia seppur in maniera non proporzionale alla percentuale di

aggiunta del Bio-char.

Infatti, dall'analisi FE-SEM condotta negli studi precedenti (Restuccia, 2016) si nota come i provini con il materiale pirolizzato abbiano un percorso di frattura più articolato e tortuoso e dunque molto meno lineare rispetto alla tipica frattura fragile del cemento. Da ciò si spiega la variazione del comportamento post-picco del materiale e l'aumento della capacità di assorbire energia prima della rottura.

Nella figura seguente (6.4.1) si mettono a confronto le curve F-CMOD per i tre tipi di provino.



6.4.1. Grafico F-CMOD per tre tipi di provini

Conclusioni e sviluppi futuri

Con lo sviluppo di "mega-costruzioni" e dei relativi componenti, i nuovi materiali da costruzione devono essere sempre più performanti ed innovativi, allo stesso tempo il processo di fabbricazione tradizionale dovrà divenire sempre più efficiente e sostenibile per far fronte all'emergenza ambientale, con l'obiettivo di produrre materiali da costruzione tradizionali con prestazioni migliori e con un minor consumo di energia.

Per questo motivo, si sta diffondendo sempre di più l'idea di un calcestruzzo verde, definito come un calcestruzzo che utilizza materiali di scarto in almeno uno dei suoi componenti e/o non porta alla distruzione ambientale con il suo processo produttivo.

Il presente lavoro di tesi si è focalizzato sull'uso del Bio-char nei compositi a base cementizia in diverse percentuali di aggiunta rispetto al peso del cemento, in linea con gli studi sperimentali precedenti (Restuccia, 2016).

In tali studi, il Bio-char utilizzato è stato auto-prodotto attraverso la pirolisi di rifiuti agro-alimentari a differenza di quello utilizzato nella presente attività sperimentale, che risulta standardizzato per semplificare il processo di confezionamento della pasta cementizia ad alte prestazioni.

Dai risultati delle prove meccaniche si è mostrato un promettente miglioramento della resistenza, della tenacità e della duttilità.

Infatti si sono registrati valori di resistenza a flessione e di energia di frattura maggiori per i provini con aggiunta di Bio-char rispetto ai quelli dei provini privi. Inoltre, al variare della percentuale di aggiunta rispetto al peso del cemento non si sono evidenziate delle sostanziali variazioni dei parametri misurati.

Tuttavia i valori di modulo di rottura e di energia di frattura risultano

inferiori se confrontati con gli studi precedenti (Restuccia, 2016).

Questo potrebbe essere legato alla differente temperatura di pirolisi utilizzata nella produzione del Bio-char, 800 °C, rispetto ai 700 °C che non permette di eliminare eventuali olii e gas presenti.

I risultati potrebbero quindi essere influenzati dal tipo di materiale carbonioso e dai parametri di produzione piuttosto che dalle sue dimensioni.

L'obiettivo della tesi è stato raggiunto e l'esito delle prove è stato nel complesso positivo e soddisfacente.

La speranza è quella di lasciare una linea di ricerca, al fine di diffondere l'utilizzo di calcestruzzi sostenibili e durevoli e raggiungere alte prestazioni.

Bibliografia e sitografia

- Materials and the Environment Eco-Informed Material choise Michael F. Ashby
- Sergio Lucci, Silvia Poletti: “Lo sviluppo sostenibile”, alfa test 2015
- Gianluca Senatore: “Storia della sostenibilità”, Collana Confini sociologici, 2013
- Spunti di riflessione sulla sostenibilità del ciclo di vita delle infrastrutture in calcestruzzo, Federbeton, 2010
- Calcestruzzo la base del costruire sostenibile, Atecap
- Spunti di riflessione sulla sostenibilità del ciclo di vita delle infrastrutture in calcestruzzo, Federbeton, 2010
- Il Calcestruzzo armato sostenibile, Grandi cambiamenti con piccole scelte, Aziende Associate Assiad.
- Enzo Tiezzi, Nadia Marchettini:” Che cos'è lo sviluppo sostenibile? Le basi scientifiche della sostenibilità e il guasto del pensiero unico”, Donzelli Editore Roma.
- Viviana Vestrucci, articolo:” Se il clima mette a rischio il Pianeta”, 2015
- Enciclopedia britannica
- V. Mohan Malhotra, articolo: Cemento Portland ed emissioni di gas serra durante la produzione
- Ente Italiano di Normalizzazione
- Scienza delle Costruzioni 2, A. Carpinteri
- Schmidt, H.P., “55 Uses of Biochar”, Ithaka Journal, 1, pp. 286–289, 2012

- Schmidt, H.P., “Biochar as building material for an optimal indoor climate” Freitag, 4, 2014
- Choi, W.C., Yun, H.D., Lee, J.Y., “Mechanical properties of mortar containing biochar from pyrolysis”, Journal of the Korea for structural maintenance inspection, 3, pp. 67-74, 2012.
- www.ipcc.ch
- www.ingenio-web.it
- www.riciclanews.it
- www.romanoimpero.com
- www.cementkilns.com
- https://www.betonrossi.it
- www.improntaecologica.it
- www.campesato.it
- www.improntaecologica.it
- www.lifegate.it/persone/stile-di-vita/architettura-sostenibile