

**POLITECNICO DI TORINO**

**Corso di Laurea Magistrale in  
Ingegneria Edile**

Tesi di Laurea Magistrale

**La sostenibilità nella progettazione agli  
Stati Limite delle strutture in c.a.**



**Relatore**

prof. Alessandro P. Fantilli

**Candidato**

Rodia Pietro

Marzo 2018



# Indice

<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1. RISCHIO AMBIENTALE E FORME DI INQUINAMENTO</b>	<b>2</b>
<b>1.1 IL RISCHIO AMBIENTALE</b>	<b>3</b>
1.1.1 Definizione di rischio	3
1.1.2 Definizione di rischio ambientale	4
1.1.3 La relazione storica tra società e rischio ambientale	4
<b>1.2 LE FORME DI INQUINAMENTO</b>	<b>8</b>
1.2.1 Inquinamento del suolo	8
1.2.2 Inquinamento atmosferico	9
1.2.3 Inquinamento idrico	10
1.2.4 Inquinamento termico	11
1.2.5 Altre forme di inquinamento	11
1.2.6 Inquinamento locale e inquinamento globale	13
<b>1.3 L'EFFETTO SERRA E IL BUCO DELL'OZONO</b>	<b>15</b>
1.3.1 Il riscaldamento globale	15
1.3.2 Il buco dell'ozono	16
<b>CAPITOLO 2. LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE</b>	<b>18</b>
<b>2.1 LO SVILUPPO SOSTENIBILE</b>	<b>19</b>
2.1.1 Il concetto di sviluppo sostenibile	19
2.1.2 Sostenibilità debole e sostenibilità forte	23
<b>2.2 IL PERCORSO STORICO DELLA SOSTENIBILITÀ</b>	<b>27</b>
2.2.1 Le date fondamentali	27
2.2.2 Le sfide dell'Unione Europea	33
<b>CAPITOLO 3. LA SOSTENIBILITÀ NELLE COSTRUZIONI IN C.A.</b>	<b>36</b>
<b>3.1 LE STRATEGIE DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI CO<sub>2</sub></b>	<b>37</b>
3.1.1 Material substitution strategy	38
3.1.2 Material performance strategy	39
3.1.3 Conclusioni dello studio	41
<b>3.2 LE CENERI VOLANTI</b>	<b>42</b>

3.2.1	Origine delle ceneri volanti	43
3.2.2	Composizione chimica	44
3.2.3	Distribuzione granulometrica	45
3.2.4	Normative di riferimento	47
<b>CAPITOLO 4. DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO</b>		<b>48</b>
4.1	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>49</b>
4.2	<b>IL CALCOLO AGLI STATI LIMITE: LA FLESSIONE SEMPLICE</b>	<b>53</b>
4.2.1	Il controllo della deformazione flessionale	55
4.2.2	La durabilità e lo spessore del copriferro	56
4.2.3	Un nuovo modo di progettare le travi in c.a.	56
4.2.4	Applicazione del Modello "A"	57
4.2.5	Analisi dei risultati – Modello "A"	59
4.2.6	Definizione $A_{smin}$ e distinta dei ferri longitudinali	60
4.2.7	Definizione di $A'_s$	61
4.3	<b>IL CALCOLO AGLI STATI LIMITE: LO SFORZO DI TAGLIO</b>	<b>62</b>
4.3.1	Progetto dell'armatura trasversale	63
4.3.2	Definizione di $A_{swmin}$ e distinta dei ferri trasversali	64
4.3.3	Determinazione dell'impatto globale della trave	65
<b>CAPITOLO 5. APPLICAZIONE DEL MODELLO</b>		<b>67</b>
5.1	<b>CONFRONTO CON IL MODELLO "A"</b>	<b>68</b>
5.1.1	Risultati ottenuti	70
5.2	<b>L'ANALISI DELLE VARIABILI ALL'INTERNO DEL MODELLO</b>	<b>71</b>
5.2.1	Definizione delle variabili	71
5.2.2	Definizione dei diagrammi S-BI	72
5.2.3	Analisi dei risultati ottenuti	75
5.3	<b>RICERCA DELLA FUNZIONE GENERALE</b>	<b>76</b>
5.3.1	Analisi dei risultati ottenuti	77
5.4	<b>LO STATO LIMITE DI SOSTENIBILITÀ</b>	<b>79</b>
5.4.1	Considerazioni finali	81
<b>CONCLUSIONI</b>		<b>82</b>
<b>ALLEGATO I. DIAGRAMMI BI-S</b>		<b>85</b>
<b>ALLEGATO II. DIAGRAMMI bi-S</b>		<b>109</b>

<b>ALLEGATO III. DIAGRAMMI bi-S-SLS</b>	<b>113</b>
-----------------------------------------	------------

<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>117</b>
---------------------	------------

<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>119</b>
-----------------------	------------



## INTRODUZIONE

Alla base di questo studio vi è l'analisi del calcolo strutturale delle strutture in cemento armato all'interno del contesto normativo europeo, ponendo l'attenzione non solo sulle disposizioni dell'EC2 in materia di Stati Limite e deformazione, ma in particolare sull'impatto ambientale provocato in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte.

Le motivazioni che mi hanno spinto ad approfondire tale tema hanno un duplice natura. L'interesse nei confronti dell'ambito del calcolo strutturale maturato già durante gli studi triennali, è stato ulteriormente incentivato dall'analisi di alcune tematiche svolte nell'ultimo anno di università e da alcune esperienze, altamente formative, vissute durante il mio tirocinio universitario. Inoltre, lo sviluppo e l'implementazione di un nuovo metodo di progettazione strutturale atto a contribuire allo sviluppo di un sistema sostenibile e meno inquinante, è stato un ulteriore incentivo personale.

L'obiettivo di questa tesi di laurea è quello di fornire i concetti base di un nuovo *modus operandi* nella progettazione strutturale, in ottica del rispetto dei limiti normativi imposti in materia ambientale da parte dell'Unione Europea.

In particolare, sulla base dei risultati ottenuti dagli studi di Habert e Roussel (G. Habert, 2009) sulle strategie di riduzione delle emissioni inquinanti, è stato sviluppato un modello di calcolo volto a misurare la quantità di anidride carbonica emessa in atmosfera durante il processo di produzione di cemento, relativa alla progettazione di una trave in cemento armato in configurazione di semplice appoggio. Nella seconda parte dello studio, è stata effettuata un'analisi dei risultati ottenuti confrontando le diverse combinazioni applicate al modello di calcolo, al variare di alcuni parametri geometrici, strutturali e ambientali.

Grazie a questo lavoro di ricerca è stato possibile analizzare alcuni importanti fattori legati alle variazioni della percentuale di sostituzione di clinker con ceneri volanti (*fly ashes*) e della resistenza meccanica dei calcestruzzi utilizzabili durante la fase di progettazione, risultati che saranno esposti dettagliatamente nelle conclusioni finali di questa tesi.

# **CAPITOLO 1. RISCHIO AMBIENTALE E FORME DI INQUINAMENTO**

## 1.1 IL RISCHIO AMBIENTALE

Il continuo sviluppo delle società industrializzate e l'enorme divario di quest'ultime con quelle presenti in altre zone del pianeta, sono la causa - in misura più o meno rilevante - dei livelli ormai insostenibili e molto pericolosi raggiunti dall'inquinamento ambientale, il quale pone l'intera popolazione umana di fronte a una serie di nuove emergenze.

### 1.1.1 DEFINIZIONE DI RISCHIO

In generale, il rischio è rappresentato dalla possibilità che un fenomeno naturale o provocato dalle attività antropologiche possa causare effetti dannosi sulla popolazione, sugli insediamenti abitativi e/o produttivi e le relative infrastrutture, all'interno di una particolare area, in un determinato periodo di tempo. Tale concetto non è solo legato alla capacità di calcolare la probabilità che un evento pericoloso possa accadere, ma dipende anche alla capacità di definire l'entità del danno provocato.

Per valutare concretamente un rischio non è sufficiente conoscere il pericolo, e quindi la possibilità che un evento calamitoso possa colpire o meno una determinata area, ma occorre anche stimare attentamente il valore esposto, cioè i beni presenti sul territorio che possono essere coinvolti da tale evento.

Il rischio è quindi determinabile secondo la seguente formulazione:

$$R = P \cdot V \cdot E$$

dove:

- **Pericolosità P:** è la probabilità che un fenomeno di una certa intensità si verifichi in un determinato periodo di tempo, in una data area;
- **Vulnerabilità V:** è la propensione di un elemento (edifici, infrastrutture, persone, attività economiche) a subire danneggiamenti a causa delle sollecitazioni indotte da un evento di una certa intensità;
- **Esposizione (o Valore Esposto) E:** è il numero di unità, ovvero il valore, di tutti gli elementi a rischio presenti in una data area.

### **1.1.2 DEFINIZIONE DI RISCHIO AMBIENTALE**

Il rischio ambientale è direttamente legato alla produzione, alla gestione e alla distribuzione di beni, servizi o prodotti, derivanti dai tre settori economici (ovvero settore agricolo, industriale e terziario), che possono costituire una causa di incidenti con ricadute nel breve periodo sulla salute della popolazione. Il deterioramento dell'ambiente, l'intensificarsi dei disastri ambientali, l'effetto serra, la perdita della biodiversità e i relativi rischi per la salute umana rivelano come oggi il mondo in cui viviamo sia molto più rischioso rispetto ad un passato non molto lontano.

Analizzando uno stesso evento dannoso, si desume che lo sforzo economico di una bonifica risulta maggiore del costo dell'installazione di meccanismi e di dispositivi atti a ridurre fin dal principio gli effetti negativi dello stesso. Inoltre, non è affatto trascurabile il fatto che sia possibile porre rimedio efficacemente alle situazioni pericolose entro un determinato livello di inquinamento, oltre il quale gli interventi si mostreranno sempre meno efficienti.

### **1.1.3 LA RELAZIONE STORICA TRA SOCIETÀ E RISCHIO AMBIENTALE**

La relazione tra società e rischio ambientale può essere analizzata sotto aspetti differenti a seconda del periodo temporale di riferimento. Infatti, l'arco temporale che viene analizzato è spesso frammentato in epoche di diversa durata per cogliere meglio alcuni confronti di interesse. Nello specifico, è stato possibile suddividere tale arco temporale in cinque macro-ere (De Marchi, Pellizzoni, & Ungaro, 2001), dagli anni '50 alla fine degli anni '90, di seguito analizzate con maggiore dettaglio.

#### **1.1.3.1 Gli anni '50-'60**

È il periodo nel quale si possono riscontrare le prime attenzioni da parte di un pubblico via via crescente nei riguardi dei rischi ambientali, a causa delle prime crisi ecologiche locali e i relativi problemi tecnologici e/o produttivi, rientrate però in pochissimo tempo. D'altro canto, è il periodo in cui è evidente come i processi avviati alla fine del secolo precedente abbiano raggiunto livelli di efficienza elevati, portando così ad un incredibile aumento della produzione industriale e conseguente consumo di beni complessi.

In questo periodo, si verificano i primi incidenti a danno di petroliere e conseguente riversamento di olii e combustibili in ambiente marino con una frequenza di accadimento decisamente alta che ha causato lo sterminio di buona parte di flora e fauna marina.

Inoltre, vengono avviati i primi programmi di test nucleari americani e europei (Inghilterra, Francia e Russia su tutti), che destano non poca preoccupazione a livello globale. In conseguenza a varie esplosioni di bombe all'idrogeno (1954 nell'atollo di Bikini) e nucleari (ben 423 tra il 1945 e il 1962),

nel 1963 si è arrivati alla firma di un trattato tra USA, URSS e UK che vieta tali esplosioni in atmosfera. Vengono rilevati incidenti anche in campo non bellico, come ad esempio una serie di incendi in alcuni impianti nucleari con conseguente rilascio in atmosfera di sostanze radioattive.

In ambiente urbano, iniziano ad intravedersi le prime forme di organizzazione di protesta a causa della bassissima qualità dell'aria respirata e dell'acqua usata nei servizi. Si ricorda, il genocidio di milioni di pesci del fiume Reno nel 1969 a causa dell'uso dell'endosolfante, un pesticida che colpisce il loro sistema nervoso. L'inquinamento di questo fiume internazionale cresce lungo tutto il corso fino al suo arrivo nei Paesi Bassi, ricevendo man mano le acque usate dalle città che esso attraversa, gli scarti degli impianti minerari e delle industrie chimiche della Ruhr (Bonafant, 1977).

### **1.1.3.2 Gli anni '70**

È il periodo che sancisce il passaggio dall'ambientalismo ingenuo degli anni '60 a quello razionale ed organizzato. Nel 1970 l'Earth Day scuote il grande pubblico, esponendo le problematiche derivanti dallo sviluppo tecnologico ed industriale adottati fino a quel momento. Si punta il dito contro i nuovi preoccupanti casi di inquinamento ma, in maggior misura, si pone attenzione sui rischi causati dal sovra-popolamento e la relativa insostenibilità della crescita economica.

La crisi energetica causata dall'embargo petrolifero del mondo arabo, orienta il via via crescente numero delle organizzazioni ambientaliste verso il mondo della ricerca di nuove fonti di energia rinnovabile. Iniziano le pubblicazioni di libri riguardo il rapido esaurimento delle risorse energetiche, alimentando il catastrofismo e scuotendo il mondo scientifico.

Nel 1972 a Stoccolma si riunisce la prima conferenza mondiale sull'ambiente, atta a sensibilizzare in maniera ufficiale il problema ambientale. Sette anni dopo, viene lanciato il programma mondiale sul clima.

### **1.1.3.3 Gli anni '80**

Durante il decennio degli anni '80 vengono sostituiti i materiali più inquinanti con altri aventi emissioni nocive minori, viene introdotto per la prima volta la pratica del riciclaggio, i processi produttivi vengono resi più efficienti orientando il settore industriale verso un maggior impiego di programmazione ed automazione, risultando quindi un settore che predilige una produzione a commessa anziché a piazzale.

In particolare, la situazione italiana è parecchia attiva sul fronte ambientale. Tra il 1983 e il 1987 il WWF triplica il suo numero di iscritti (passa da 30000 a 110000) mentre la neo-nata Lega Ambiente passa da 15000 a 30000 sostenitori nello stesso periodo. Inoltre nel 1986 viene istituito il Ministero

per l'Ambiente e introdotta, tramite richiesta di una direttiva europea, la Valutazione di Impatto Ambientale (VIA).

Nel 1985, dopo quasi 10 anni di misurazioni, viene scoperta un assottigliamento della fascia d'ozono al di sopra dell'Antartide (poi comunemente definito successivamente "buco dell'ozono"). I governi mondiali tramite dapprima con la Convenzione di Vienna (istituita alla fine del 1985) e con il Protocollo di Montreal (1987) poi, si impegnano a ridurre la produzione e il consumo dei gas clorofluorocarburi (CFC), considerati l'unica causa della rarefazione dello strato di ozono.

A Chernobyl, una città distante 80 chilometri da Kiev durante la notte tra il 25 e il 26 aprile 1986 nel corso di una prova di sicurezza, si verifica un'esplosione di un reattore nucleare: muoiono nell'immediato 30 persone. Al termine di poche settimane dopo l'incidente si contano altri 200 decessi di operai che avevano subito gravissime contaminazioni radioattive durante le operazioni di copertura del reattore danneggiato con un enorme strato di calcestruzzo. Ad oggi, nonostante le radiazioni emesse durante l'esplosione e durate ancora per i decenni successivi, la città conta ancora circa 700 abitanti, per lo più anziani, che non hanno voluto abbandonare le loro case, incuranti del pericolo. Si è misurata un'alta incidenza dei tumori e delle malformazioni dei cittadini residenti nella zona colpita, anche a distanza di una generazione. Inoltre, è stato calcolato che l'esplosione del reattore quattro della centrale nucleare di Chernobyl abbia rilasciato in atmosfera una quantità di radiazioni pari a circa 100 volte quelle emesse in occasione delle bombe cadute su Hiroshima e Nagasaki.

La scoperta della presenza di una nube di tale tossicità sopra l'Europa, mostra come scienziati ed esperti risultano gravemente impreparati ad affrontare un incidente nucleare di tali proporzioni. Si ritiene, ancora, che alcuni test nucleari effettuati nel corso del XX secolo abbiano liberato quantità di radiazioni ancora maggiori. Negli anni successivi, la maggior parte dei Paesi si vedranno costretti a modificare i propri piani di sviluppo in materia di energia nucleare, abbandonandola lentamente (a meno di Cina e Giappone).

Per la prima volta, durante la World Commission on Environmental and Development (WCED, 1987), viene avanzata l'idea di sviluppo sostenibile nel "Rapporto Brundtland". L'idea di base era quella di avanzare delle proposte per lo sviluppo economico, tali da non pregiudicare la disponibilità di risorse ambientali per le generazioni future. In seguito a tale rapporto, vengono rilasciati numerosi documenti di programmazione economica e legislazioni nazionali ed internazionali durante le successive conferenze delle Nazioni Unite.

#### **1.1.3.4 Gli anni '90**

In questi anni si è assistito al declino della modernizzazione ecologica così ambita nel decennio precedente, a causa delle difficoltà di raggiungere gli obiettivi preposti. Gli investimenti in tecnologie pulite restano limitati alle sole grandi aziende che operano in settori importanti e/o di grande visibilità.

L'opinione pubblica continua a riscontrare interesse verso i nuovi problemi, quali i cambiamenti climatici, l'ingrandimento del buco dell'ozono, l'inquinamento elettro-magnetico, lo smaltimento delle scorie radioattive e la perdita della biodiversità in alcune aree del pianeta.

A Rio De Janeiro, nel 1992, durante la conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente e lo sviluppo, viene firmata da 55 Paesi (a meno degli Stati Uniti) una convenzione sulle politiche a protezione dell'ambiente.

Si susseguono vari incontri nel corso degli anni successivi, frammentando ancor di più il sapere scientifico, aumentando il confronto tra le opinioni contrastanti, facendo trasparire solo la percezione di un mondo meno sicuro.

#### **1.1.3.5 Il XXI Secolo**

Con l'entrata in vigore del protocollo di Kyoto nel 2005 i Paesi firmatari si impegnano a ridurre le emissioni di gas serra entro il 2020, registrando un cambio di rotta netto rispetto all'atteggiamento negativo degli anni '90. Le varie scoperte hanno raggiunto un livello di maturità tale da poter essere riportate in modelli tecnologici concreti e applicabili. Anche in campo normativo, vengono emessi numerose agevolazioni fiscali in campo privato, a patto di una conversione dei classici metodi di produzione energetica del passato, sostituendoli con sistemi di fonte energetica rinnovabile.

Nel 2015, a Parigi, dopo 21 conferenze mondiali e 23 anni dall'Earth Summit di Rio De Janeiro, si è raggiunto il primo accordo sul clima in cui tutti i Paesi si impegnano in modo attivo a diminuire le emissioni dei gas serra. Si tratta di un obiettivo molto ambizioso, nemmeno lontanamente immaginabile fino alla fine del secolo precedente. Infatti, i Paesi non solo si impegnano a limitare al di sotto dei due gradi centigradi il livello della temperatura media globale rispetto all'era preindustriale, ma anche a incrementare i finanziamenti per la riduzione delle emissioni dei gas serra.

## 1.2 LE FORME DI INQUINAMENTO

Viene definita inquinamento l'alterazione di una caratteristica ambientale in grado di compromettere la biosfera danneggiandone uno o più ecosistemi. Tale alterazione, specialmente a partire dall'era pre-industriale, è causata nella stragrande maggioranza dalla presenza dell'uomo. Oramai, infatti, si parla di inquinamento nei soli fatti connessi alle attività antropiche e non naturali (ad esempio emissioni di gas naturale, ceneri vulcaniche, ecc.). Di seguito, vengono elencate e analizzate varie forme di inquinamento causate dalle attività umane.

### 1.2.1 INQUINAMENTO DEL SUOLO

Il suolo costituisce il più prezioso capitale di cui l'uomo dispone per la soddisfazione dei suoi bisogni. Il complesso delle comunità biologiche dipende da questo sottile strato fecondo sulla superficie del pianeta. Tuttavia, il suolo non è un semplice serbatoio inerte, inesauribile. È, in realtà, un ambiente complesso in continuo cambiamento che può essere distrutto quando il suo equilibrio viene compromesso o è semplicemente dilavato dall'acqua o dagli agenti atmosferici. Pur essendo in continua formazione, esso è continuamente soggetto a logorio, sia di ordine naturale che artificiale. L'energia solare e l'atmosfera permettono al suolo di ricostituirsi naturalmente, ma tale processo è estremamente lento (dai 4 ai 10 secoli per uno spessore di circa 3 cm), mentre l'uomo mediante le sue attività o le intemperie possono distruggerlo in pochissimi anni, nonché in poche ore.

L'agricoltura moderna, specie nei primi anni '60, non esige soltanto spazi più vasti in nome della meccanizzazione. Per fertilizzare i terreni e migliorarne i rendimenti, essa ha abbandonato i metodi strettamente naturali ricorrendo largamente agli agenti chimici. Dopo averne visto i soli vantaggi, l'uomo comincia solo ora a riflettere sugli inconvenienti di tali prodotti, quali concimi, antiparassitari, insetticidi, utilizzati sempre di più per aumentare la produttività dei terreni agricoli e per lottare contro gli insetti nocivi.

L'arsenale pesticida è terribile: la sua importanza è legata alla comparsa improvvisa di prodotti chimici di sintesi. Ogni anno, un flusso continuo di nuovi prodotti chimici nocivi esce dai laboratori, contandone quasi 500 diversi all'anno negli Stati Uniti. La gravità della situazione è aggravata dal fatto che in principio essi venissero utilizzati indiscriminatamente in tutto il settore agricolo, noncuranti del fatto che si potessero contaminare altre forme di vita. Si ricorda a titolo di esempio, l'innaffiamento massiccio mediante aereo di granulati di aldrina nel 1959 a Detroit per contrastare la presenza della *Popilia japonica* (scarabeo del Giappone). Poco dopo, le strade si trovarono cosparse di uccelli morti, cani e gatti venivano colpiti da forti diarree, vomito e forti convulsioni.

Inoltre alcune persone erano prese da nausea e si sentivano molto stanche. La scelta di quell'operazione era stata dettata prevalentemente da ragioni economiche, e non tecniche. Ma per certo, i cittadini hanno pagato maggiormente in termini di salute i danni causati dalle scelte un po' superficiali delle autorità.

Nel Sud America, le monocolture sarchiate sono in principal modo responsabili dell'erosione intensiva del suolo. Sin dagli inizi del XIX Secolo, la coltura del cotone occupa la maggior parte della produzione agricola degli Stati del Sud, a causa della continua richiesta delle filature inglesi. I piantatori sono unicamente preoccupati dall'aumento della loro produzione e i relativi guadagni, estendendo poco a poco le loro colture, dissodando selvaggiamente superfici considerevoli. Nei campi in pendio, una semplice pioggia poteva asportare fino a trenta centimetri di strato superficiale del terreno, ormai impoverito e perso per sempre.

La contaminazione del suolo dai metalli pesanti è invece, per la maggior parte, causata dalla produzione industriale che immette nell'ambiente, unitamente ai suddetti metalli, numerose altre specie di sostanze nocive, quali acidi e solventi. Il tutto, aggravato dal collegamento tra inquinamento atmosferico e quello del suolo, in grado di provocare danni ambientali ed economico tramite la generazione di piogge acide ed inquinanti gassosi.

### 1.2.2 INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Un'altra piaga del mondo moderno è l'inquinamento atmosferico, definito dall'Enciclopedia Treccani come *"termine usato per indicare la presenza nell'aria di sostanze, allo stato di gas, vapori, nebbie o pulviscoli, che possano riuscire nocive o moleste agli esseri viventi o dannose per i materiali utili; spesso viene anche usata la parola inglese smog ottenuta per fusione da smoke (fumo) e fog (nebbia) [...]"*<sup>1</sup>.

Gli agenti inquinanti non sono necessariamente di origine antropica ma anche di tipo naturale, quali emissioni naturali di gas o polveri portate dai venti; ma il termine è associato alle attività umane nella stragrande maggioranza dei casi. Le cause antropiche e industriali dell'inquinamento atmosferico devono essere ricercate nelle attività di produzione industriale, l'estrazione di minerali, l'incenerimento dei rifiuti e da processi di combustione derivanti dalle attività agricole.

C'è voluto molto tempo per prendere coscienza del pericolo che l'aria inquinata fa correre alla popolazione delle città delle regioni industriali, e non solo. Occorsero alcuni incidenti drammatici perché si giungesse a considerare l'inquinamento atmosferico un vero e proprio flagello

---

<sup>1</sup> Enciclopedia Treccani, [www.treccani.it/enciclopedia/inquinamento-atmosferico\\_%28Enciclopedia-Italiana%29/](http://www.treccani.it/enciclopedia/inquinamento-atmosferico_%28Enciclopedia-Italiana%29/)

generalizzato, responsabile di fenomeni cronici. I principali inquinanti sono il biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ), gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ), il monossido di carbonio (CO), l'ozono ( $\text{O}_3$ ), le polveri (specialmente il particolato avente diametro inferiore a 10 milionesimi di metro, il benzene e il piombo. I principali inquinanti emessi nell'atmosfera sono principalmente presenti in forma gassosa e derivano tipicamente dalla combustione di combustibili fossili, quali derivanti dai processi industriali o dal semplice traffico cittadino. Il futuro in campo motoristico, sembra andare verso l'elettrico, con l'obiettivo principale di ridurre le emissioni di  $\text{CO}_2$  in atmosfera. Durante uno studio svedese condotto allo Swedish Environmental Research Institute di Stoccolma, si è analizzato il ciclo di vita (LCA, Life Cycle Assessment) delle grandi batterie agli ioni di litio utilizzate per i veicoli elettrici<sup>2</sup>. Secondo i ricercatori, la produzione di batterie al momento genera l'immissione in atmosfera di enormi quantità di  $\text{CO}_2$ , ma si prospetta che nel giro di qualche anno la produzione delle batterie potrebbe causare emissioni molto più basse rispetto quelle odierne. Infine, vi è una correlazione lineare tra la potenza delle batterie e le relative quantità di anidride carbonica emesse. Tale relazione dovrebbe portare le autorità a promuovere il settore di ricerca e sviluppo per vetture elettriche più piccole, a discapito di modelli più grandi e performanti.

Il problema delle emissioni di gas serra e dei conseguenti danni verranno trattati in maniera più approfondita più avanti nel paragrafo 1.3.

### 1.2.3 INQUINAMENTO IDRICO

Lo sfruttamento disordinato del territorio e delle sponde dei laghi e fiumi e delle coste, sta mettendo negli ultimi decenni a dura prova gli habitat acquatici. Ne sono principalmente responsabili la mancata o inadeguata depurazione delle acque reflue civili, i rifiuti delle attività industriali e quelle agricole. In passato l'inquinamento delle acque era un problema legato soprattutto ai rischi di contaminazione biologica: a causa della scarsità di servizi igienici, l'acqua inquinata costituiva il miglior veicolo di contagio e diffusione di molte malattie.

C'è una categoria di acque che subisce maggiormente gli effetti nocivi dell'inquinamento idrico: è il caso delle acque sotterranee dove l'aggressione si verifica in tempi molto più lunghi a causa della lenta infiltrazione degli inquinanti attraverso gli strati del terreno. I prodotti di scarto dell'industria si combinano all'argilla o ad altre sostanze organiche, distruggendo i filtri naturali che garantiscono la naturale depurazione delle acque: ciò comporta un passaggio nel quale passerà per sempre acqua inquinata. Le stesse piogge acide, causate dall'inquinamento atmosferico, contribuiscono alla contaminazione del suolo prima e delle falde acquifere poi, rinnovando questo ciclo pericoloso.

---

<sup>2</sup> <https://www.focus.it/tecnologia/motori/quanto-inquina-davvero-l-auto-elettrica>

### **1.2.4 INQUINAMENTO TERMICO**

L'inquinamento termico è causato dall'emissione in qualsiasi ambiente di sostanze che causano un aumento indesiderato della temperatura dello stesso: ciò comporta, nella maggior parte dei casi, delle variazioni degli ecosistemi viventi che si ripercuotono via via a catena in tutti gli altri. Il principale problema moderno causato dall'innalzamento della temperatura media globale è sicuramente il scioglimento dei ghiacci polari, e tutte le varie ripercussioni.

Tali sostanze derivano principalmente da processi industriali, nonché dallo scarico di acqua calda proveniente dalle centrali elettriche. Il calore può essere liberato in atmosfera, nei fiumi o in ambiente marino, accumulandosi a tal punto da modificare il flusso naturale dell'energia termica. L'aumento termico causato dallo scarico delle acque utilizzate per il raffreddamento di alcuni macchinari, provoca la variazione dei processi vitali e alla morte della flora batterica utile nei processi di autodepurazione dell'acqua. Le specie che sono intolleranti al calore possono estinguersi, mentre altre possono prosperare in maniera inappropriata.

L'inquinamento termico può avere una grande influenza sull'ecosistema acquatico: i tassi di crescita e di respirazione possono cambiare e ciò può alterare i tassi di alimentazione degli organismi, il periodo di riproduzione può essere posticipato e lo sviluppo può venire accelerato. Inoltre, un aumento della temperatura implica una diminuzione nella solubilità dell'ossigeno e, specialmente in presenza di inquinamento organico, può provocare la perdita di specie sensibili (ad esempio, l'aumento esponenziale di crescita di alcune specie di alghe, ha provocato la moria di interi banchi di pesci a causa della bassissima concentrazione di ossigeno in acqua).

Negli ultimi tempi, si sta cercando di prevenire e/o ridurre l'inquinamento termico mediante il riutilizzo dell'acqua calda usata per il raffreddamento dei macchinari per riscaldare le abitazioni (ovvero tramite il sistema di teleriscaldamento).

### **1.2.5 ALTRE FORME DI INQUINAMENTO**

#### **1.2.5.1 Inquinamento fotochimico**

È una particolare categoria di inquinamento che si manifesta in giornate caratterizzate da una forte insolazione. È facilmente individuabile a causa del colore arancio-giallastro delle nubi che circondano alcune città. Il colore caratteristico è dovuto principalmente dalla presenza di grandi quantità di ossidi di azoto nell'aria (prodotti anche da molti processi naturali) che si combinano tra loro indotti dalla luce ultravioletta dei raggi solari. Da questi, vengono prodotte alcune sostanze tra cui ozono, perossiacetil nitrato (PAN), perossibenzoil nitrato (PBN) e centinaia di altri composti

molto inquinanti, considerati altamente tossici per l'uomo, per gli animali, per i vegetali e sono, inoltre, in grado di degradare molti materiali dato il loro forte potere ossidante.

#### **1.2.5.2 Inquinamento acustico**

È un danneggiamento dell'ambiente urbano e naturale da parte delle attività antropiche dovuto ad un'eccessiva produzione di suoni di elevata intensità. Le principali conseguenze si vedono nel mondo animale, disorientandone molte specie e, in alcuni casi, portandone anche alla morte (ad esempio, lo scoppio dei fuochi d'artificio provocano un alto numero di decessi tra gli animali domestici, causa infarto). Inoltre, è in grado di causare nel tempo, nelle persone che ne sono continuamente sottoposte, problemi psicologici, sbalzi di pressione sanguigna e stress.

#### **1.2.5.3 Inquinamento luminoso**

È un'alterazione dei livelli di luce naturale presenti nell'ambiente notturno che può essere più o meno elevata a seconda delle località. Tale alterazione provoca danni sia ambientali, sia culturali che economici. Tra i danni ambientali si annoverano l'alterazione dei ritmi circadiani di piante, animali e popolazione umana, e la difficoltà o perdita di orientamento in alcuni uccelli migratori, animali notturni e tartarughe marine. Nel settore scientifico, l'astrologia risulta quella più danneggiata a causa del cielo troppo luminoso che limita l'efficienza dei telescopi ottici. In campo economico, il danno è costituito dallo spreco di energia elettrica impiegata per illuminare inutilmente zone che non andrebbero illuminate, in particolar modo la volta celeste. Uno dei temi trainanti della lotta all'inquinamento luminoso è quello del risparmio energetico.

#### **1.2.5.4 Inquinamento elettro-magnetico**

È legato alla generazione di campi elettrici, magnetici ed elettro-magnetici artificiali emessi da impianti realizzati per trasmettere informazioni attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche (es. televisori e telefonia mobile), da impianti utilizzati per il trasporto e la trasformazione dell'energia elettrica dalle centrali di produzione fino all'utilizzatore in ambiente urbano, da apparati per applicazioni biomedicali, da impianti per lavorazioni industriali, nonché da tutti quei dispositivi il cui funzionamento è subordinato ad un'alimentazione di rete elettrica. La Comunità Europea ed altri organismi internazionali si preoccupano da anni per definire e disciplinare i valori SAR (Specific Absorption Rate: indica la quantità di energia elettromagnetica assorbita dal corpo umano per unità di massa [W/kg] (1999/519/CE, 1999)), partendo dalla considerazione di come si è evoluto il mercato delle telecomunicazioni. Tutelare a salute umana è un'esigenza condivisa che si cerca di soddisfare con normative armonizzate volte a limitare i livelli massimi di esposizione. Le normative fissano gli standard che le aziende produttrici di dispositivi elettronici devono rispettare per immetterli in commercio. Il calcolo del livello massimo di

emissioni elettromagnetiche di un dispositivo elettronico viene effettuata con metodologie differenti a seconda della tipologia (telefoni cellulari, portatili, dispositivi a parete o a pavimento, come router Wi-Fi ed elettrodomestici), ed agli standard seguiti nei vari mercati da produttori e laboratori indipendenti.

### 1.2.6 INQUINAMENTO LOCALE E INQUINAMENTO GLOBALE

È possibile distinguere due livelli di inquinamento: inquinamento locale e inquinamento globale. In passato era convinzione comune che solo gli impatti di tipo locale fossero un vero e proprio problema.

Tale convinzione era dovuta all'errata concezione di diluizione degli inquinanti: infatti, si riteneva che quando gli agenti nocivi fossero stati sufficientemente diluiti, non potessero più costituire un danno. Ovviamente, col passare dei decenni si è resi conto di come le attività umane (in particolar modo i test nucleari) abbiano costantemente innalzato i livelli di radiazione di fondo di tutto il pianeta, e di conseguenza possano costituire un fattore tutt'altro che innocuo per la salute umana e non solo.

L'origine delle più gravi forme di inquinamento è da ricercarsi negli stabilimenti industriali: raffinerie petrolchimiche, inceneritori, impianti per la produzione di materie plastiche, discariche per rifiuti urbani, discariche per rifiuti nucleari, ecc. Tra gli agenti inquinanti più comuni possiamo rammentare i clorofluorocarburi (CFC), benzene, metalli pesanti (il piombo, fino a pochi decenni fa utilizzato nell'industria dei carburanti), cromo, mercurio, zinco, cadmio (all'interno delle pile ricaricabili al nichel-cadmio) e l'arsenico.

Nel settore dei trasporti, particolare attenzione viene prestata al mondo dei motori Diesel, considerato sì efficiente, ma al tempo stesso uno dei motori più inquinanti. A tal proposito, nei primi anni del XIX Secolo, il gruppo PSA iniziò ad installare sulle proprie vetture a gasolio un filtro (DFP, Diesel Particulate Filter) in grado di limitare le emissioni di agenti inquinanti derivanti dalla combustione presenti nei gas di scarico (denominati PM<sub>10</sub>). Tale soluzione venne proposta nell'immediato anche da altri gruppi automobilistici, rendendone obbligatoria la presenza nei veicoli con motore Diesel. Vi è tutt'ora un acceso dibattito sull'effettiva efficacia di tali filtri, poiché durante la fase di rigenerazione, le particelle inquinanti vengono bruciate e poi liberate in atmosfera. Numerose ricerche<sup>3</sup> denotano, però, come la presenza o meno di una particolare valvola EGR (Exhaust Gas Recirculation) possa essere molto rilevante nel conteggio delle emissioni inquinanti.

---

<sup>3</sup> <https://www.bikeitalia.it/2017/02/08/filtro-antiparticolato-sui-motori-diesel/>

Gli inquinanti, oltre ad alterare il sistema naturale e danneggiare l'ambiente, sono una causa dimostrata di molte malattie, tra cui lupus, malattie del sistema immunitario, allergie, asma e vari forme di cancro (dal 2006 al 2012, sono stati registrati ben 21313 nuovi casi di cancro in provincia di Taranto, sede dell'Ilva, la più grande acciaieria d'Europa<sup>4</sup>).

---

<sup>4</sup>

[http://www.repubblica.it/oncologia/news/2018/01/04/news/taranto\\_i\\_nuovi\\_dati\\_del\\_registro\\_tumori\\_la\\_situazione\\_rimane\\_critica\\_-185788398/](http://www.repubblica.it/oncologia/news/2018/01/04/news/taranto_i_nuovi_dati_del_registro_tumori_la_situazione_rimane_critica_-185788398/)

## 1.3 L'EFFETTO SERRA E IL BUCO DELL'OZONO

L'effetto serra è figlio della presenza di un'atmosfera attorno ad un pianeta in grado di assorbire e trattenere parte dei raggi infrarossi emessi dalla superficie di suolo riscaldata dalla radiazione ricevuta da una stella. Di conseguenza, è chiaro che l'effetto serra permette alla Terra di avere una temperatura media globale tale da consentire la vita così come la conosciamo. I gas serra, ovvero le sostanze che determinano l'effetto serra sul nostro pianeta, sono principalmente anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), vapore acqueo, metano (CH<sub>4</sub>), biossido di azoto (NO<sub>2</sub>) ed ozono (O<sub>3</sub>).

Il Sole emette una quantità di energia di gran lunga superiore a quella generata in totale sulla Terra dall'uomo. In condizioni di equilibrio, la totale radiazione ricevuta è bilanciata da una quantità di energia riflessa (circa il 30%, prevalentemente dalle nubi) e da una quantità riemessa come radiazione di corpo nero (il restante 70%). La quota parte di energia non riflessa viene assorbita dalle nuvole (4%), dall'atmosfera (16%) e dalla superficie e dalle acque terrestri (50%), tramutandosi in energia termica.

Sin dalla rivoluzione neolitica, a causa della riduzione della biomassa degli ecosistemi artificiali agricoli dovuta alle prime attività antropiche, l'uomo ha intensificato la concentrazione dei gas serra in atmosfera. Un forte innalzamento dei livelli di tali gas si è verificata durante il massiccio utilizzo di combustibili fossili, intaccando le riserve geologiche di carbonio, e la maggiore produzione di metano relativa all'impennata del settore dell'allevamento e delle colture a sommersione (il riso, ad esempio). Anche i prodotti di sintesi, come i CFC, contribuiscono all'intensificazione dell'effetto serra.

In generale, i Paesi che maggiormente contribuiscono alle emissioni dei gas serra sono quelli industrializzati, seguiti da quelli in via di sviluppo in maniera altrettanto significativa. La posizione capolista di questa triste classifica è stata ottenuta dagli Stati Uniti, seguiti a ruota dalla nuova grande economia cinese.

### 1.3.1 IL RISCALDAMENTO GLOBALE

Con il termine riscaldamento globale si indica l'aumento della temperatura media globale dell'atmosfera terrestre e degli oceani nel corso degli anni. Il mondo scientifico ha stimato che l'aumento di temperatura riscontrato negli ultimi 60 anni è attribuibile in gran parte alle attività antropiche.

Ogni anno vengono riversate nell'atmosfera circa 25 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub>, e solo meno della metà di tali emissioni vengono riassorbite dalle specie vegetali presenti sulla Terra grazie alla fotosintesi clorofilliana.

L'alterazione del ciclo del carbonio è problematica non tanto a causa della sua entità, quanto per la sua velocità, con una crescita di emissioni di anidride carbonica di circa 2 ppm all'anno (si è passati da una concentrazione di CO<sub>2</sub> di 280 ppm nel XVII Secolo, ai circa 380 ppm misurati nel 2005). Le oscillazioni naturali del ciclo del carbonio hanno sempre causato i cicli pluriennali delle glaciazioni. Ad oggi, è importante comprendere come e con quali conseguenze il pianeta (sistema caratterizzato da una forte inerzia) possa adattarsi al velocissimo aumento di anidride carbonica.

Il riscaldamento globale, conosciuto anche come "global warming", sta già provocando un aumento del livello medio marino, sia a causa dell'espansione termica che dello scioglimento dei ghiacci continentali e dei ghiacciai montani, dove il limite delle nevi perenni continua ad alzarsi di anno in anno. L'acqua disciolta raggiunge mari e oceani, modificandone non solo la salinità, ma anche la quantità e la qualità delle precipitazioni: dagli anni '70 ad oggi il numero e l'intensità dei cicloni tropicali sono aumentati considerevolmente. È abbastanza complesso prevedere con certezza quali potrebbero essere i nuovi scenari: ad esempio un inabissamento della Corrente del Golfo causato dalla diminuzione della salinità dell'Oceano Atlantico, potrebbe addirittura innescare un raffreddamento del continente europeo.

### 1.3.2 IL BUCO DELL'OZONO

Si definisce comunemente buco dell'ozono (O<sub>3</sub>) la transitoria riduzione ciclica dell'ozonosfera nelle regioni polari. Per estensione, il termine viene utilizzato per indicare l'assottigliamento dello strato di ozono della stratosfera, riscontratosi a partire dalla fine degli '70.

Lo strato di ozono ricopre un ruolo fondamentale nella biosfera, in quanto trattiene circa il 99% delle radiazioni UV provenienti dal Sole, fungendo da filtro per i raggi ultravioletti, parziali inibitori della fotosintesi clorofilliana delle piante, dannosi per la pelle (melanomi) e capaci di eliminare il fitoplancton, base della catena alimentare marina.

La molecola di ozono, se colpita dalle radiazioni UV, reagisce scindendosi in una di ossigeno biatomico e una in ossigeno monoatomico: O<sub>2</sub> + O. Durante la notte, l'ossigeno monoatomico, altamente reattivo, si combina con le molecole di ozono, formando due molecole di ossigeno biatomico (O<sub>3</sub> + O = 2O<sub>2</sub>) contribuendo all'assottigliamento dello strato protettivo di ozono.

Nel settembre del 1987, gli strumenti installati a bordo di un aereo in volo dal Sud America al Polo Sud mostrarono come la presenza di ozono risultava inversamente proporzionale a quella del

monossido di cloro e che la concentrazione di quest'ultima fosse particolarmente elevata nella zona intorno al polo. Nello stesso anno, la mancata firma del Protocollo di Montreal - che imponeva la progressiva riduzione della produzione di CFC – da parte dei maggiori Paesi industrializzati, rese tale accordo debole e poco efficace. Nell'anno successivo, però, USA e UE dichiararono di cessare la produzione dei cinque più comuni CFC entro il 2000, decisione che poi venne condivisa da altri 90 Paesi a Londra nel 1990. Successive misurazioni rivelarono come la distruzione dello strato di ozono proseguisse più velocemente di quanto stimato, portando altri Paesi a cessare la produzione di clorofluorocarburi entro il 2010.

Una critica mossa numerose volte alle teorie sul buco dell'ozono è quella riguardante la correlazione tra CFC e tale assottigliamento, soprattutto alla luce del fatto che questi ultimi fossero più pesanti dell'aria e quindi non potessero essere in grado di raggiungere la stratosfera. In realtà le turbolenze dell'aria sono abbastanza forti da mescolare completamente tutti i gas presenti nell'atmosfera, che quindi non risultano più ordinati in base al peso. Inoltre, nonostante il consenso generale della comunità scientifica sulle suddette teorie, non mancano alcuni punti oscuri: ad esempio, non è stato possibile stabilire un collegamento statistico diretto tra l'impoverimento dello strato di ozono e l'incremento di melanomi, forte fattore di rischio rappresentato dalla maggiore esposizione alle radiazioni ultraviolette.

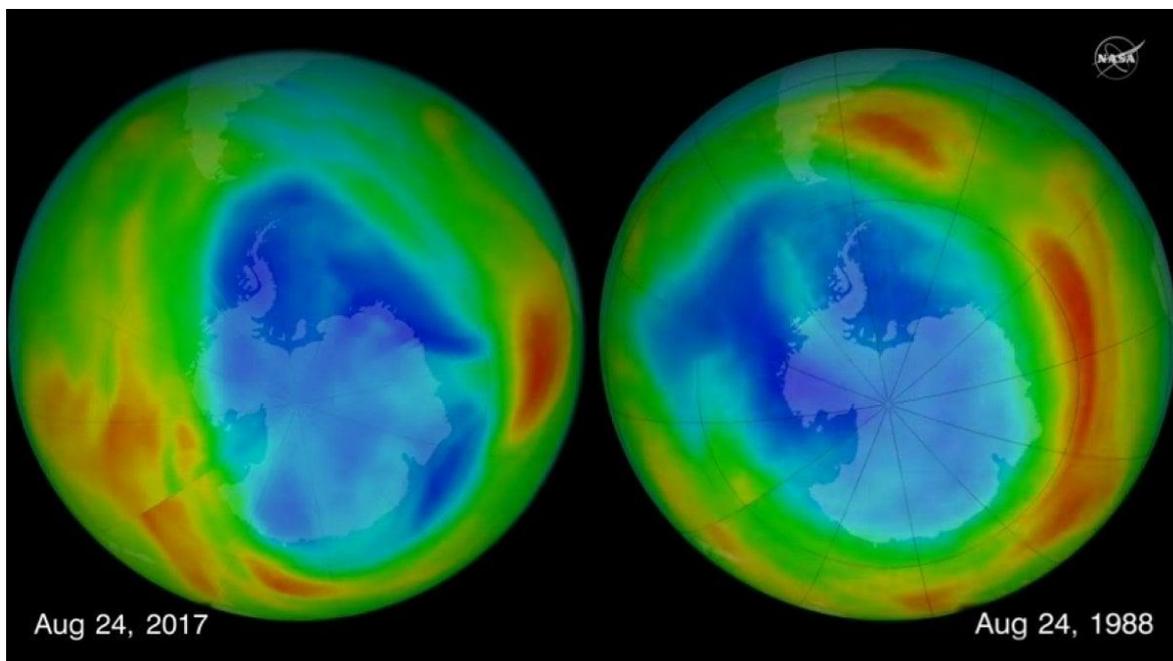


Figura 1 –Buco dell'ozono: il confronto 1988-2017 (NASA Goddard Space Flight Center/Kathryn Mersmann)<sup>5</sup>

<sup>5</sup> [http://www.repubblica.it/ambiente/2017/11/04/news/nasa\\_il\\_buco\\_dell\\_ozono\\_ai\\_minimi\\_dal\\_1988-180216750/](http://www.repubblica.it/ambiente/2017/11/04/news/nasa_il_buco_dell_ozono_ai_minimi_dal_1988-180216750/)

## **CAPITOLO 2. LA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE**

## 2.1 LO SVILUPPO SOSTENIBILE

*"Nelle scienze ambientali ed economiche, condizione di uno sviluppo in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere le possibilità delle generazioni future di realizzare i propri. [...]"<sup>6</sup>*

La prima definizione di sviluppo sostenibile è contenuta nel rapporto Brundtland del 1987 e poi ripresa dalla Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo dell'ONU (WCED, World Commission on Environment and Development).

Suddetta definizione comprende qualsiasi forma di sviluppo, da quello economico a quello urbano, fino a quello delle comunità. L'obiettivo è di mantenere uno sviluppo economico compatibile con gli ecosistemi, operante quindi in regime di equilibrio ambientale.

### 2.1.1 IL CONCETTO DI SVILUPPO SOSTENIBILE

Il concetto di sviluppo sostenibile sintetizza un problema di ampia complessità: come rendere compatibili le esigenze economiche con le ragioni dell'ambiente nell'intero pianeta. Le riflessioni intorno a questo nodo sono scaturite dalla consapevolezza, emersa a partire dai primi anni '70, di una netta contraddizione tra la crescita continua del prodotto lordo materiale dei diversi Paesi e la limitatezza delle risorse disponibili, nonché dell'impossibilità da parte dell'ambiente di assorbire i rifiuti e le emissioni inquinanti.

Lo sviluppo sostenibile rappresenta una visione globale ed integrata del concetto di sviluppo, una strategia che si articola su diversi livelli: può essere definito come una forma di sviluppo non solo economico ma anche sociale, in cui la crescita economica avviene entro i limiti delle possibilità ecologiche degli ecosistemi ambientali e della loro capacità di soddisfare i bisogni delle generazioni future.

"Il rapporto Brundtland evidenzia inoltre che il problema ambientale è strettamente connesso a un **problema sociale e politico** e un **problema economico**. Si introducono, così, le tre declinazioni della sostenibilità:

- **SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE:** si intende la capacità di preservare nel tempo le tre funzioni dell'ambiente: di fornitore di risorse, di ricettore di rifiuti e di fonte diretta di utilità, garantendo al contempo la tutela e il rinnovamento delle risorse naturali e del patrimonio;

---

<sup>6</sup> Enciclopedia Treccani, [www.treccani.it/enciclopedia/sostenibilita](http://www.treccani.it/enciclopedia/sostenibilita)

- **SOSTENIBILITÀ SOCIALE:** si intende la capacità di garantire le condizioni di benessere umano (sicurezza, salute, istruzione) equamente distribuite per classi e per genere e altresì la capacità dei soggetti di intervenire insieme, efficacemente, in base ad una stessa concezione del progetto, incoraggiata da una concertazione fra i vari livelli istituzionali;
- **SOSTENIBILITÀ ECONOMICA:** si intende la capacità di un sistema economica di generare una crescita duratura degli indicatori economici: in particolare, la capacità di generare reddito e lavoro per il sostentamento delle popolazioni, e altresì la capacità di produrre e mantenere all'interno del territorio il massimo del valore aggiunto combinando efficacemente le risorse, al fine di valorizzare la specificità dei prodotti e dei servizi territoriali.<sup>77</sup>

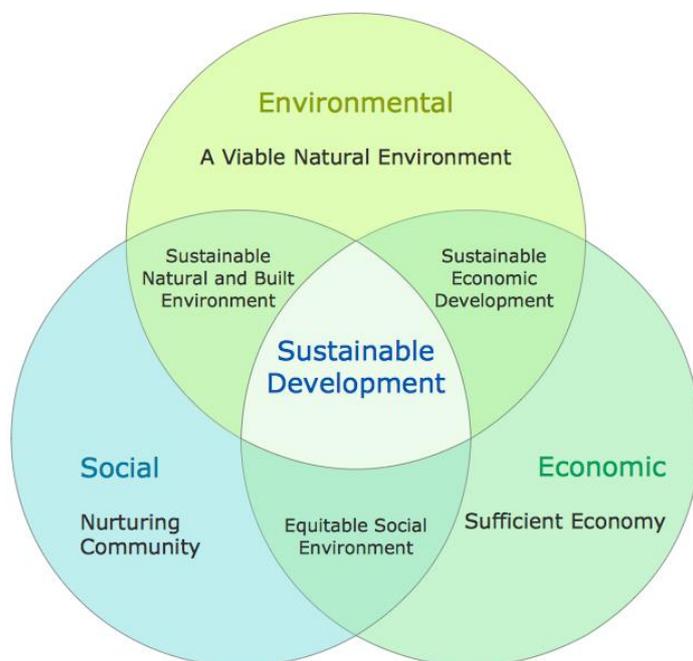


Figura 2 - Diagramma delle interazioni delle tre tipologie di sostenibilità<sup>8</sup>

È evidente come tali dimensioni siano strettamente interrelate tra loro e, pertanto, non devono essere considerate come elementi indipendenti, ma devono essere analizzate in una visione sistemica, quali elementi che insieme contribuiscono al raggiungimento di un fine comune. Ciò significa che ogni intervento di programmazione deve tenere conto delle reciproche interrelazioni. Nel caso in cui le scelte di pianificazione privilegino solo una o due delle sue dimensioni non si verifica uno sviluppo sostenibile.

<sup>7</sup> [http://www.sogesid.it/sviluppo\\_sostenibile.html](http://www.sogesid.it/sviluppo_sostenibile.html), SOGESID S.p.A.

<sup>8</sup> <http://www.conceptdraw.com/examples/sustainable-development-diagram>

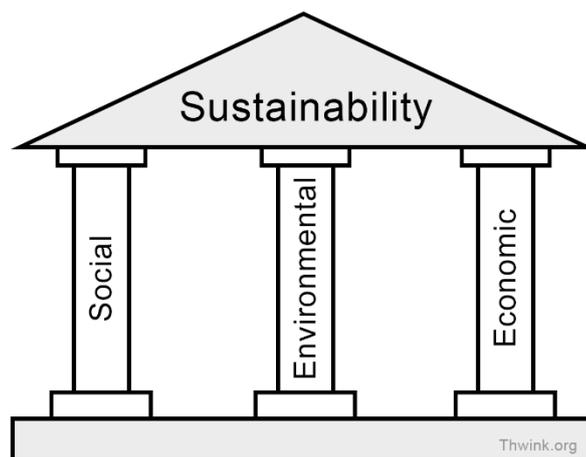


Figura 3 - I tre pilastri della sostenibilità<sup>9</sup>

“Con l’affermarsi del principio di sviluppo sostenibile, le politiche ambientali superano una visione strettamente difensiva e di contrapposizione rispetto allo sviluppo senza limitazioni, per avviare un processo di politiche proattive mirate a attivare strumenti per l’integrazione tra ambiente, sviluppo economico e contesto sociale. Tale processo, è regolato secondo la regola delle tre “e”: **EQUITÀ, ECONOMIA E ECOLOGIA.**

- **EQUITÀ:** lo sviluppo sostenibile richiede strutture e organizzazioni sociali che forniscano alle comunità gli strumenti per gestire e controllare razionalmente le risorse. La sostenibilità sociale si fonda su un elevato grado di equità e giustizia sociale, di identità culturale e coesione sociale, di partecipazione alle scelte da parte di tutte le categorie sociali secondo quelle che sono le proprie capacità e di assunzione di responsabilità individuali e collettive;
- **ECONOMIA:** una definizione di reddito sostenibile che esso indichi quanto un soggetto possa consumare in un dato periodo di tempo senza ridurre il suo capitale di partenza. Questa, se applicata al complesso delle risorse del pianeta intese come capitale naturale, potrebbe rappresentare un’importante definizione di sostenibilità. L’approccio delle società a forte industrializzazione è però molto differente, a causa della poca considerazione, fino a pochi decenni fa, cui godeva l’ipotesi che le risorse naturali potessero esaurirsi in tempi relativamente brevi, né si pensava che la portata dei cambiamenti indotti dalle azioni umane potesse avere l’entità dimostrata oggi dai cambiamenti climatici. Inoltre, l’economia ha sempre valutato il capitale in valore monetario, ma le funzioni ecologiche (quelle svolte dal capitale naturale, che consentono alle comunità umane di poter vivere sulla Terra) hanno un prezzo di mercato che soltanto adesso si sta tentando di quantificare;

<sup>9</sup> <http://www.thwink.org/sustain/glossary/ThreePillarsOfSustainability.htm>

- **ECOLOGIA:** *lo sviluppo sostenibile implica il mantenersi entro le capacità di carico dei sistemi ecologici, regolando il prelievo di risorse naturali e l'emissione di rifiuti da parte del sistema economico, così da mantenere intatta la produttività e la funzionalità dei sistemi ecologici. In sostanza, questo si traduce nell'uso di risorse naturali in modo che ne sia garantita la rigenerazione naturale, mantenendo l'equilibrio complessivo degli ecosistemi e nell'utilizzo di risorse non rinnovabili ad un livello minimo e necessario allo sviluppo di fonti alternative rinnovabili.*<sup>10</sup>

È altresì chiaro a questo punto, che sia possibile ed appropriato rappresentare la sostenibilità dello sviluppo mediante tre cerchi concentrici, evidenziando come l'economia esista all'interno di una società, che a sua volta deve essere inclusa nell'ambiente.

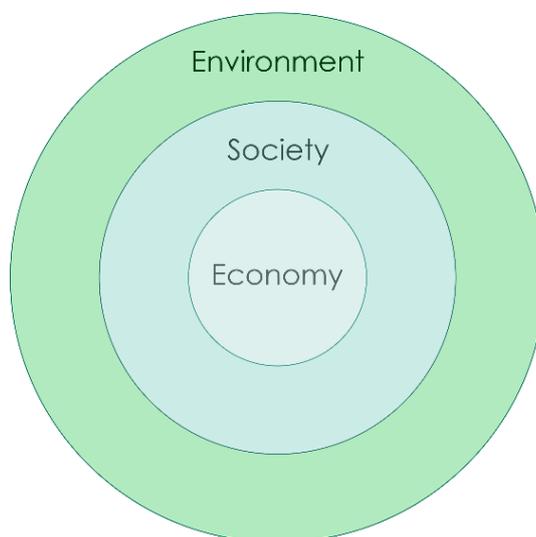


Figura 4 - Diagramma concentrico dei tre sistemi della sostenibilità

---

<sup>10</sup> [http://www.ambienteinliguria.it/eco3/ep/liguriasostenibile/documenti/rapporto\\_bruntland.pdf](http://www.ambienteinliguria.it/eco3/ep/liguriasostenibile/documenti/rapporto_bruntland.pdf)

È possibile quindi costruire una piramide della sostenibilità (Sustainable Pyramid) ponendo alla base proprio la dimensione ambientale che, attraverso la fornitura di risorse naturali, di servizi all'ecosistema e di benessere alla società, svolge un ruolo fondamentale di supporto sia dimensione economica che a quella sociale.

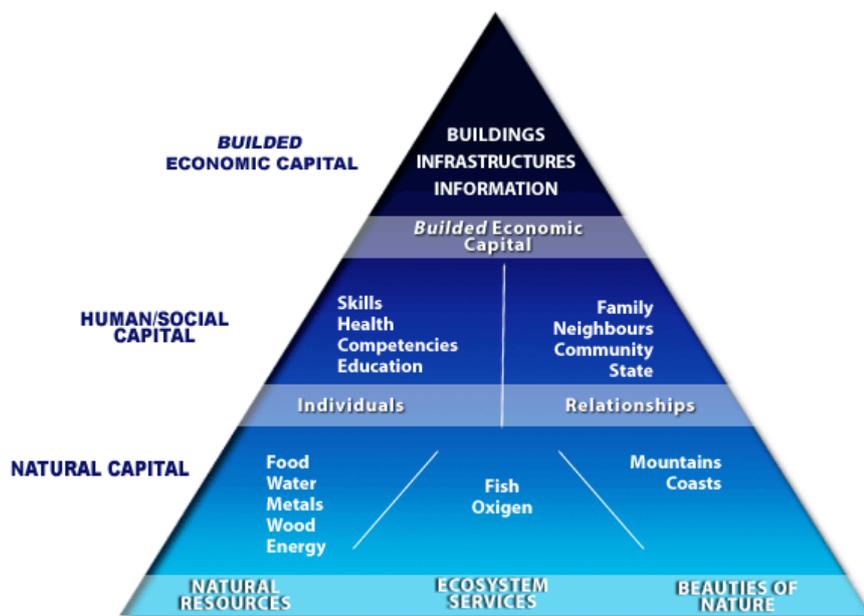


Figura 5 - Schema piramidale della sostenibilità<sup>11</sup>

Proprio per la sua triplice dimensione ambientale, sociale ed economica, lo sviluppo sostenibile necessita di sostanziali cambiamenti nei comportamenti individuali e nelle scelte dei decisori operanti ai diversi livelli di governo politico ed amministrativo.

### 2.1.2 SOSTENIBILITÀ DEBOLE E SOSTENIBILITÀ FORTE

Nel 1991 l'economista Hermann Daly conia una definizione che ha al suo interno un concetto di equilibrio necessario tra uomo ed ecosistema, che riconduce lo sviluppo sostenibile a tre condizioni generali riguardanti l'uso delle risorse naturali da parte dell'uomo. Tali condizioni sono:

- il tasso di utilizzazione delle risorse rinnovabili non deve superare il loro tasso di rigenerazione;
- l'immissione di sostanze inquinanti e di scorie nell'ambiente non deve superare la capacità di carico dello stesso;
- lo stock di risorse non rinnovabili deve restare costante nel tempo.

<sup>11</sup> [http://www.sogesid.it/english\\_site/Sustainable\\_Development.html](http://www.sogesid.it/english_site/Sustainable_Development.html)

Le strategie individuabili tali da rispettare le tre condizioni di equilibrio sono due: sostenibilità debole e sostenibilità forte.

### 2.1.2.1 Sostenibilità debole

La sostenibilità debole, portata avanti da economisti come Solow e Stiglitz, ritiene che il capitale artificiale possa eventualmente sostituire il capitale naturale grazie alle innovazioni in campo tecnologico, per cui l'attenzione viene rivolta al mantenimento di uno stock di capitale complessivo (naturale e artificiale). Si tratta, quindi, di mantenere costante la somma di tutti i contributi.

Secondo questa teoria, sarebbe accettabile, al limite, lo sfruttamento incontrollato del capitale naturale laddove il capitale totale prodotto fosse di valore equivalente.



Figura 6 - Schema Sostenibilità debole

Le generazioni future godrebbero comunque di una ricchezza derivata e anche in caso di danneggiamenti irreversibili (distruzione di foreste o estinzione di specie viventi), la sostenibilità verrebbe ugualmente raggiunta in quanto il capitale prodotto avrebbe prodotto un benessere proporzionato.

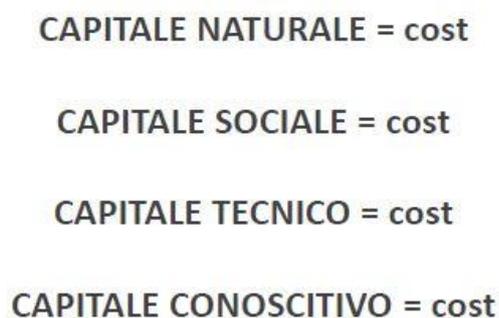
Alcune osservazioni:

- È una strategia utilizzabile solo nel breve periodo;
- Il capitale economico e quello tecnologico sono prodotti dell'attività umana basata sulla trasformazione del capitale naturale che fornisce la materia prima;
- Senza l'apporto del capitale naturale non è possibile ottenere né capitale economico né capitale tecnologico;
- È quindi evidente che non vi è la interscambiabilità tra i vari tipi di capitale.

### 2.1.2.2 Sostenibilità forte

La sostenibilità forte riconosce le necessità di mantenere costante nel tempo lo stock di capitale naturale, il quale è considerato non sostituibile con il capitale artificiale; prevede una relazione di complementarità e non di sostituibilità tra il capitale naturale e quello prodotto dall'uomo in quanto le risorse naturali non possono essere sostituite neanche dall'incremento di altri valori come quelli sociali o economici.

Tale teoria ritiene lecito consumare risorse fintanto che non si eccedano le capacità di ripristinarle.



*Figura 7 - Schema Sostenibilità forte*

Alcune considerazioni:

- È l'unica strategia applicabile nel lungo periodo, in quanto in grado di assicurare alle attività umane ed economiche di poter continuare ad esistere;
- Se portata alle estreme conseguenze, essa può causare l'immobilismo per evitare qualsiasi impatto sull'ambiente e frenare quindi l'innovazione tecnologica.

### 2.1.2.3 Posizioni intermedie

È da sottolineare che esiste anche la teoria di chi, come Arrow, ritiene che pur accettando la sostituibilità tra risorse naturali e capitale riproducibile, si possa determinare una inefficienza (non-ottimalità) del sentiero di sviluppo sostenibile.

In una posizione intermedia tra le nozioni di sostenibilità debole e sostenibilità forte si colloca il riconoscimento dell'esistenza di un valore intrinseco delle risorse ambientali; l'esistenza, cioè, di diritti propri dei beni ambientali indipendenti dal loro uso attuale o potenziale (capacità di fornire servizi) da parte del genere umano. Ogni componente dell'ecosistema (fauna, flora, ecc.) ha così un diritto che deve essere tutelato nello sviluppo economico.

Quando un'attività incrementa la minaccia nei confronti della salute umana o dell'ambiente, devono essere prese delle misure precauzionali, anche se alcune relazioni di causa effetto non sono pienamente comprovate dal punto di vista scientifico. Questo tipo di approccio prende il nome di **principio di precauzione**.

È particolarmente indicato per attività di lungo periodo rispetto alle quali non ci può essere semplicemente una attribuzione di responsabilità di chi le ha realizzate, poiché i tempi sono troppo lunghi per una verifica. Il settore delle costruzioni è uno di questi.

## 2.2 IL PERCORSO STORICO DELLA SOSTENIBILITÀ

### 2.2.1 LE DATE FONDAMENTALI

#### **1972 – Conferenza di Stoccolma (United Nations Conference on the Human Environment)**

La Conferenza di Stoccolma è stato un incontro internazionale tenuto dalle Nazioni Unite dal 5 al 16 giugno 1972. Per la prima volta vengono adottati a livello internazionale alcuni principi che saranno alla base del concetto di sviluppo sostenibile:

*"L'uomo è portatore di una solenne responsabilità per la protezione e il miglioramento dell'ambiente per le generazioni presenti e future"*

*"Le risorse naturali della Terra devono essere salvaguardate a beneficio delle generazioni presenti e future attraverso una programmazione e una gestione appropriata e attenta"*

*"Deve essere mantenuta e, ove possibile, ricostituita e migliorata la capacità della Terra di produrre risorse vitali rinnovabili"*

#### **1987 – Rapporto Brundtland (Our Common Future)**

Per la prima volta viene definito il concetto di sviluppo sostenibile come *"uno sviluppo che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni"*.

È una definizione molto generale per un approccio unitario allo sviluppo e all'ambiente, in base alla considerazione che un ambiente degradato e impoverito nelle sue risorse non possa garantire uno sviluppo durevole e socialmente accettabile. La tutela dell'ambiente non viene più considerata come un vincolo ma come una condizione indispensabile per uno sviluppo duraturo.

#### **1992 – Conferenza di Rio de Janeiro (Earth Summit)**

Durante questa conferenza vengono gettate, a livello mondiale, le basi per dare l'avvio ai programmi di risanamento ambientale del nostro pianeta, vengono enunciati i principi su cui impostare le politiche nazionali ed internazionali e vengono poste in evidenza le problematiche globali di cui tutti gli stati devono prendere coscienza. Da questa nascono i seguenti documenti:

- **Dichiarazione di Rio sull'ambiente e lo sviluppo:** sostituisce la "Carta della Terra", un documento che doveva chiarire i diritti e doveri degli individui e degli Stati rispetto al tema dell'ambiente, che sarebbe dovuta essere l'obiettivo finale della conferenza, ma mai raggiunto.

- **Dichiarazione autorevole di principi sulle foreste;**
- **Agenda 21:** documento contenente il programma di azioni per il XXI Secolo. Ha avuto un seguito ed esistono numerosi tentativi di applicazione a livello locale, come le Agende 21 regionali e quelle comunali. È un documento di carattere tecnico in cui si propone la conservazione e la gestione delle risorse e si indicano le tematiche ambientali specifiche: la lotta contro la desertificazione, la deforestazione, l'individuazione degli obiettivi, l'attribuzione dei compiti ai vari Stati e vengono stabiliti i mezzi tecnici e finanziari di esecuzione ed i trasferimenti di tecnologie da perseguire;
- **Convenzione sul cambio climatico;**
- **Convenzione sulla biodiversità:** ribadisce l'importanza della conservazione delle diverse forme di vita vegetale e animale che costituiscono il patrimonio genetico dell'umanità (gli Stati Uniti non hanno aderito a questa Convenzione).

#### **1992 – V Programma d'azione**

Il V Programma d'azione dell'Unione Europea a favore dell'ambiente riconosce alle autorità locali un ruolo particolarmente significativo nell'assicurare la sostenibilità dello sviluppo, mediante l'esercizio delle proprie funzioni statutarie, quali autorità competenti per molti dei regolamenti e delle direttive vigenti, nel contesto dell'applicazione pratica del principio di sussidiarietà.

#### **1993 – Piano nazionale per lo sviluppo sostenibile**

In Italia viene emanato il "Piano nazionale per lo sviluppo sostenibile, in attuazione dell'Agenda 21" (prov. CIPE del 28.12.1993). È un esame dello stato di attuazione delle politiche ambientali in atto, senza apportare sostanziali modifiche e novità nella politica ambientale del Paese.

#### **1994 – Carta Di Aalborg**

In occasione della "Conferenza europea sulle città sostenibili" è stato effettuato il primo vero passo dell'attuazione dell'Agenda 21 locale, firmata da ottanta amministrazioni locali ed oltre 250 rappresentanti di governi, istituzioni scientifiche e organismi internazionali, nonché da associazioni di imprenditori, consulenti e cittadini. Vengono definiti i principi base per uno sviluppo sostenibile delle città, che devono mantenersi in stretto contratto tra loro, e gli indirizzi per i piani d'azioni locali.

### **1996 – Conferenza di Lisbona**

Si tratta di un aggiornamento della carta di Aalborg in senso più applicativo, promuovendo strumenti operativi (indicatori, gestione ambientale, VIA, EMAS, ecc.) e socio-politici (partecipazione, consenso e cooperazione).

### **1997 – Protocollo di Kyoto (in vigore dal 2005)**

Il Protocollo di Kyoto è l'unico accordo internazionale che sancisce una limitazione delle emissioni ritenute responsabili dell'effetto serra, dei cambiamenti climatici e del surriscaldamento globale. Deriva direttamente dalle riflessioni venute fuori dall'Earth Summit, studiando un protocollo che stabilisce tempi e procedure per realizzare gli obiettivi programmati nel 1992 a Rio. Per i Paesi industrializzati l'obbligo è **ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 5.2% rispetto ai livelli del 1990**, nel periodo di adempimento che va dal 2008 al 2012 (non è una quota uguale per tutti i Paesi). Bisogna considerare che dati i trend evolutivi dei Paesi coinvolti, l'emissione di gas serra sarebbe stata nel 1998 del +20% rispetto al 1990, e quindi la **riduzione totale che si chiede è del 25 %**.

All'interno del Protocollo di Kyoto sono stati formalizzati tre grandi strumenti per favorire l'attuazione degli obblighi e la cooperazione internazionale:

- **Join Implementation:** corrisponde grosso modo ad un metodo di attuazione congiunta degli obblighi. È uno strumento di cooperazione all'interno del gruppo dei Paesi ai quali il Protocollo impone l'obbligo di riduzione delle emissioni. Tali Paesi possono decidere di formare un gruppo per attuare congiuntamente i loro impegni, accordandosi al loro interno su di una distribuzione diversa degli obblighi rispetto alla distribuzione prevista originariamente dalla Conferenza di Kyoto, purché venga rispettato l'obbligo complessivo risultante dall'unione di tutti gli obblighi individuali spettanti ai singoli paesi coinvolti;
- **Emission Trading:** consiste nel trasferimento e acquisto di diritti e di emissione tra Paesi. Viene data la possibilità a un Paese, nel caso in cui esso riesca a ridurre le proprie emissioni in una quota maggiore rispetto a quella assegnata, di vendere la rimanente parte delle sue consentite ad un altro Paese che non è in grado di raggiungere l'obiettivo che gli spetta. La commercializzazione di diritti di emissione non è però libera, ma sottostà ad una duplice condizione: tra il Paese che cede e Paese che acquista deve esistere una cooperazione su un progetto finalizzato alla riduzione delle emissioni. Il progetto deve essere infine già stato ufficializzato ed approvato dai Paesi coinvolti;

- **Clean Development Mechanism:** è identificato come un sistema di collaborazione e cooperazione internazionale tra Paesi industrializzati e Paesi in via di sviluppo su programmi e progetti congiunti che servano all'attuazione degli impegni contenuti nel Protocollo e a dare impulso allo sviluppo sostenibile. In altre parole, i Paesi sviluppati possono decidere di ridurre tramite compensazione parte delle proprie emissioni in Paesi terzi con progetti di trasferimento di tecnologie "verdi" o progetti per lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili o anche di valorizzazione del patrimonio forestale.

### **1997 – XIX Assemblea Generale delle Nazioni Unite (Rio+5)**

Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente; aggiornamento quinquennale dopo l'Earth Summit di Rio del 1992. Si tiene a New York.

### **1998 – Dichiarazione delle Agende 21 Locali Baltiche**

Seconda conferenza regionale svoltasi a Turku (Finlandia) intitolata "Salute e città sostenibili".

### **1999 – Dichiarazione di Siviglia**

Terza conferenza regionale, intitolata "Conferenza euromediterranea delle città sostenibili", svoltasi a Siviglia (Spagna).

### **1999 – Dichiarazione dell'Aja**

La quarta ed ultima conferenza regionale si è svolta a l'Aja (Paesi Bassi), intitolata "Strategie per le città sostenibili".

### **2000- Appello di Hannover**

Conferenza europea dalla quale sono emersi i seguenti principi:

- garantire il benessere delle generazioni presenti e future;
- valorizzare le differenze, riconoscendo che contribuiscono alla ricchezza sociale;
- favorire un'economia socialmente giusta ed ecologicamente efficiente;
- condividere la responsabilità per lo sviluppo sostenibile;
- diffondere consapevolezza che un mondo pacifico sia il prerequisito per una società sostenibile;
- integrazione delle tematiche socio-ambientali nella legislazione economica;

- introduzione di un'imposta sull'energia per internalizzare i costi socio-ambientali del consumo energetico (energia sostenibili ed efficienza energetica).

### **2001 – VI Programma d'azione**

Il VI Programma d'azione dell'UE a favore dell'ambiente è focalizzato su quattro concetti fondamentali: cambiamento climatico, ambiente e salute, natura e biodiversità, gestione delle risorse naturali. Sottolinea, inoltre, l'importanza di nuove forme di partecipazione di cittadini e imprese.

### **2002 – Rio plus ten**

Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente; aggiornamento a quello di Rio, già previsto nel 1992, svolto a Johannesburg, in Sud Africa.

### **2004 – Quarta Conferenza Europea delle città sostenibili (Aalborg +10)**

La Conferenza è incentrata su dieci aree principali:

- **risorse:** energia, biodiversità, qualità delle acque, del suolo, dell'aria;
- **nuove modalità di consumo e stili di vita responsabili di cittadini e categorie sociali:** prevenire gli sprechi, riuso e riciclo delle materie, acquisti verdi e solidali;
- **traffico e mobilità sostenibile:** riduzione della mobilità privata su gomma a favore dei mezzi pubblici, integrazione dei sistemi, incentivo all'uso della bicicletta;
- **pianificazione urbana:** integrazione delle politiche ambientali, urbanistiche, sociali e culturali per una maggiore vivibilità;
- **economia locale sostenibile:** nuovi strumenti finanziari, tecnologie ecocompatibili, mercati regionali di qualità del turismo e dell'agricoltura sostenibile;
- **equità e giustizia sociale:** accesso ai servizi e all'istruzione per tutti i cittadini, inclusione sociale dell'immigrazione, solidarietà intergenerazionale;
- **salute:** monitoraggio dei fattori inquinanti e delle condizioni di lavoro, promozione di stili e condizioni di vita più salubri;
- **governance, dialogo sociale, partecipazione:** risorse educative e formative e strumenti adeguati;
- **monitorare e valutare** i risultati raggiunti per impostare le politiche future;

- **rapporto tra globale e locale:** necessità di una globalizzazione non solo economica ma anche culturale e istituzionale e orientata a una maggiore giustizia sociale come prima condizione per superare i conflitti, un nuovo rapporto di coevoluzione e di cooperazione tra le diverse dimensioni politiche, economiche e sociali che agiscono nei processi di sviluppo.

### **2012 – Conferenza sullo sviluppo sostenibile (Rio+20)**

Rio+20 rappresenta il completamento di una serie di conferenze tenute dalla Nazioni Unite delle quali l'Earth Summit del 1992 è stato il perno centrale, ponendo lo sviluppo sostenibile come priorità dell'agenda delle Nazioni Unite e della Comunità Internazionale. I principali obiettivi della conferenza sono stati:

- rinnovo dell'impegno allo sviluppo sostenibile;
- valutazione delle lacune;
- riconoscere e affrontare le nuove sfide.

### **2015 – XXI Conferenza delle Parti dell'UNFCCC (COP21)**

È stata la 21° sessione annuale della conferenza delle parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) del 1992, tenutasi a Rio De Janeiro. L'obiettivo della conferenza è stato quello di concludere, per la prima volta in oltre venti anni di mediazione da parte delle Nazioni Unite, un accordo vincolante e universale sul clima, accettato da tutte le nazioni. Il 12 dicembre 2015 i 196 Paesi partecipanti hanno concordato al termine della conferenza all'unanimità un patto globale, l'**Accordo di Parigi**, per ridurre le emissioni come parte del metodo per la riduzione di gas serra. Base portante di tutto l'accordo è l'obiettivo di **contenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli pre-industriali**, con l'impegno a limitarne l'aumento a 1.5 °C.

L'Accordo di Parigi sul clima è stato firmato il 22 aprile 2016 alla sede ONU di New York dai capi di Stato e di governi di 195 Paesi. È entrato in vigore il 4 novembre 2016, 30 giorni dopo la ratifica da parte di almeno 55 Paesi che rappresentassero almeno il 55% delle emissioni di gas serra. La novità politica di tale accordo è stata l'adesione dei maggiori produttori di gas serra, gli Stati Uniti e la Cina, che in passato avevano rifiutato di aderire al Protocollo di Kyoto per non ostacolare la loro crescita economica.

L'1 giugno 2017, il Presidente degli Stati Uniti Donald Trump, dichiara il ritiro dall'Accordo di Parigi.

### 2.2.2 LE SFIDE DELL'UNIONE EUROPEA

La problematica del cambiamento climatico, e le annesse conseguenze, da tempo considerato uno dei fenomeni aventi un impatto a lungo termine, richiede un intervento coerente da parte dell'Unione Europea, sia al suo interno che sul piano internazionale. Essa, infatti, offre agli Stati membri un quadro di riferimento di lunga veduta riguardo il problema della sostenibilità e degli effetti dei fenomeni che non possono essere gestiti unicamente a livello nazionale. In merito a tale esigenza, è stata presentata, nell'ambito della strategia Europa 2020, un'iniziativa denominata *"Un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse"*<sup>12</sup>, la quale propone una serie di piani strategici a lungo termine nei settori dei trasporti, dell'energia e del cambiamento climatico.

La strategia sopracitata prevede cinque punti principali che definiscono gli obiettivi che l'Unione Europea dovrebbe raggiungere entro il 2020. Tra questi, spiccano gli impegni all'interno del tema del clima e l'energia: gli Stati membri si sono impegnati a **ridurre le emissioni di gas serra del 20% (rispetto ai livelli del 1990)**, a portare al 20% la quota di energia ricavata da fonti rinnovabili nel mix energetico europeo e raggiungere un incremento pari al 20% dell'efficienza energetica.

Inoltre, nel febbraio 2011, il Consiglio Europeo ha riconfermato l'obiettivo dell'Unione Europea di **ridurre le emissioni di gas serra dell'80-95%**, rispetto al 1990, entro il 2050 al fine di contenere entro i 2°C il riscaldamento globale prodotto dal cambiamento climatico. Alcuni Stati membri si sono già mossi in questa direzione o sono in procinto di farlo, fissando gli obiettivi di riduzione per il 2050, senza il ricorso a compensazioni nell'ambito del mercato del carbonio.

L'analisi di vari scenari rivela che, in termini economici, la migliore opzione per raggiungere gli obiettivi fissati entro il 2050, consisterebbe nell'ottenere riduzioni interne delle emissioni del 40% e del 60% rispetto a quelle del 1990 rispettivamente nel 2030 e 2040. Ne consegue che tutti i settori devono essere in grado di contribuire alla trasformazione in un'economia a basse emissioni di carbonio, con una quota di riduzione funzione delle potenzialità economiche e tecnologiche proprie dell'i-esimo settore.

---

<sup>12</sup> COM (2011) 21: <http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe>

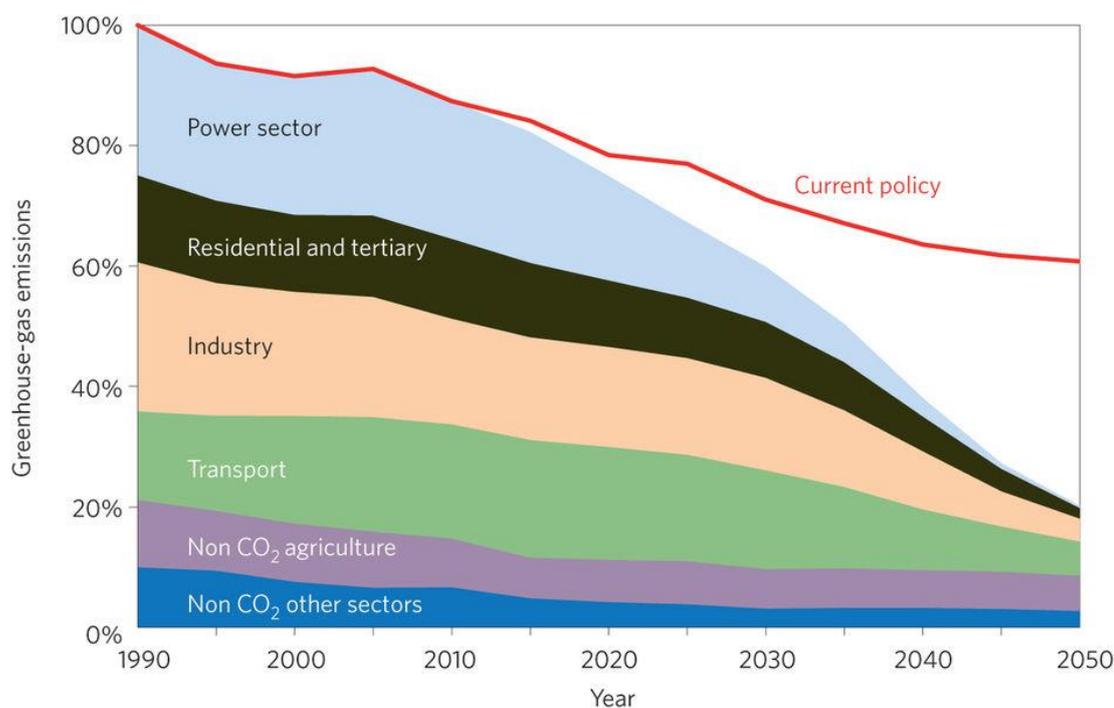


Figura 8 - Emissioni di gas serra dell'UE, verso una riduzione interna dell'80 % (100 % = 1990)

Tabella 1 – Previsioni delle riduzioni settoriali di emissioni dei gas serra rispetto al 1990

SETTORI	2005	2030	2050
Produzione di elettricità (CO <sub>2</sub> )	-7 %	-54/-8 %	-93/-9 %
Industrie (CO <sub>2</sub> )	-20 %	-34/-0 %	-83/-7 %
Trasporto aereo internazionale (CO <sub>2</sub> )	+30 %	+20/-9 %	-54/-7 %
Residenziale e servizi (CO <sub>2</sub> )	-12 %	-37/-3 %	-88/-1 %
Agricoltura (emissioni diverse dalla CO <sub>2</sub> )	-20 %	-36/-7 %	-42/-9 %
Altre emissioni diverse dalla CO <sub>2</sub>	-30 %	-72/-3 %	-70/-8 %
<b>TOTALE</b>	<b>-7 %</b>	<b>-40/-4 %</b>	<b>-79/-2 %</b>

È chiaro come il settore energetico abbia il maggior potenziale di riduzione entro il 2050, eliminando nella quasi totalità le emissioni di anidride carbonica. Protagonista di tale potenziale è l'energia elettrica, in grado di sostituire parzialmente l'utilizzo di combustibili fossili nei settori del riscaldamento e dei trasporti, provenendo da fonti rinnovabili quali energia eolica, solare, idrica e dalla biomassa.

I biocombustibili, assieme alle innovazioni nel campo dei veicoli ibridi ed elettrici, potrebbero ridurre di oltre il 60% le emissioni nel settore dei trasporti. Le emissioni prodotte dalle abitazioni domestiche e dagli uffici possono essere del tutto estinte grazie all'utilizzo della tecnologia dell'edilizia passiva nei nuovi edifici e alla ristrutturazione dei vecchi con interventi atti a migliorarne l'efficienza energetica e riducendone i consumi durante la loro vita nominale. Nel settore industriale, le tecnologie impiegate diventeranno sempre più efficienti in termini energetici, abbattendo le emissioni di oltre l'80% entro il 2050, mentre la diminuzione dell'utilizzo di fertilizzanti e concimi porterebbe a una leggera inflessione delle emissioni in agricoltura.

Gli accorgimenti sopracitati risultano essere una efficiente opzione di transazione per una società a basse emissioni di carbonio fattibile con prezzi accessibili dagli Stati membri, a patto di innovazione tecnologica e investimenti.

## **CAPITOLO 3. LA SOSTENIBILITÀ NELLE COSTRUZIONI IN C.A.**

### 3.1 LE STRATEGIE DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI CO<sub>2</sub>

Il settore industriale è responsabile di circa il 25 % delle emissioni globali di gas serra. Non meno del 5% di queste sono prodotte, nonostante gli sforzi tecnologici da parte del settore dell'industria del cemento, da cementifici. Recenti studi di Life Cycle Assessment (LCA) sulle strutture in calcestruzzo armato, mostrano come l'85 % delle emissioni di anidride carbonica sia legato alla produzione del cemento. Inoltre, nel dettaglio viene dimostrato che il 95 % della CO<sub>2</sub> viene prodotta nella fase di produzione di cemento, e solo il restante 5 % comprende le emissioni prodotte durante il trasporto di materie prime e prodotti finiti. È ovvio, quindi, che lo sforzo maggiore in termini di riduzione di emissioni di anidride carbonica debba essere fatta sul tipo e sulla quantità di cemento utilizzato nel mix design del calcestruzzo.

Per rispettare gli standard in termini di riduzione di emissioni dettati dal Protocollo di Kyoto, l'Unione Europea ha emanato differenti direttive negli anni a seguire, definendo vari livelli di emissioni massime per i settori industriali ad alta intensità energetica (industria del cemento, raffinazione del petrolio, produzione dell'acciaio e produzione di carta). Si può notare, inoltre, che tali industrie siano fortemente incoraggiate nel rispettare le direttive europee, in quanto è previsto un impatto sui costi nel caso di mancato raggiungimento degli obiettivi ambientali. Alcune stime economiche prevedono che, per le industrie ad alta intensità energetica come l'industria del cemento, in assenza di innovazioni tecnologiche, il costo sulle emissioni di CO<sub>2</sub> potrebbe raggiungere il 50 % del valore della produzione (nell'industria cartacea, tale costo corrisponde solo all'1 % del valore di produzione).

Il calcare e l'argilla sono le principali materie prime (rispettivamente l'80 % e il 20 %) utilizzate nella produzione di cemento. Esse, bruciando a 1450 °C, si trasformano in clinker il quale, una volta macinato finemente e miscelato con additivi, viene utilizzato come base per numerosi tipi di cemento. Durante il processo di produzione, vengono rilasciate in atmosfera circa 0.77 tonnellate di CO<sub>2</sub> per tonnellata di clinker prodotto (0.52 tonnellate dovute alla decarbonatazione del calcare e 0.185 tonnellate all'uso di combustibili fossili per il riscaldamento), nonostante sono già stati effettuati importanti investimenti per migliorare l'efficienza di combustione dei forni.

Sono state individuate diverse strategie di riduzione delle emissioni di anidride carbonica legate all'industria del cemento ma, in accordo con G. Habert e N. Roussel (G. Habert, 2009), è possibile individuarne due che sono strettamente correlate alla composizione del calcestruzzo armato:

- **Material substitution strategy:** sostituzione del clinker con aggiunte minerali nel cemento per ridurre il costo ambientale del materiale per unità di volume;
- **Material performance strategy:** riduzione del volume di calcestruzzo necessario per una determinata struttura, aumentandone le caratteristiche meccaniche.

In questo studio, non viene considerato il potenziale di riduzione delle emissioni derivato dalla diminuzione delle perdite di energia o dalla sostituzione dei combustibili in fase di produzione poiché si è considerato un contesto nel quale tali miglioramenti siano già stati spinti in misura considerevole (secondo le nuove direttive europee). Va tuttavia tenuto presente che ulteriori investimenti atti a migliorare ancor di più l'efficienza energetica nei forni per cemento in tutto il mondo, sebbene molto costosi, potrebbero portare a una riduzione di emissioni di anidride carbonica pari al 25 % per tonnellata di clinker prodotto.

### 3.1.1 MATERIAL SUBSTITUTION STRATEGY

Un modo per ridurre le emissioni di gas serra prodotte dalla produzione di cemento è dato dalla sostituzione parziale del clinker. Le principali sostituzioni sono rappresentate da *fly ashes* (ceneri volanti derivate da centrali termoelettriche a carbone), scorie di altoforno dell'industria dell'acciaio e del ferro, pozzolane naturali e altri scarti di produzione industriale. Questi additivi contengono grandi quantità di  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reattivi che, in presenza di calce, si trasformano in prodotti cementati.

Le uniche emissioni di  $\text{CO}_2$  che vengono prodotte durante i processi di macinazione e/o vetrificazione di alcune scorie industriali, risultano trascurabili rispetto a quelle rilasciate dalla produzione di clinker, così come quelle dovute alle aggiunte di alcuni additivi all'interno del mix-design.

Le conoscenze scientifiche necessarie per l'utilizzo di queste aggiunte minerali sono state già sviluppate da alcuni anni, favorendone, nei decenni scorsi, un largo impiego nelle miscele di calcestruzzo (più per ragioni economiche che ambientali). A seconda delle loro proprietà fisiche, quali curva granulometrica e dimensione media delle polveri, o chimiche, le aggiunte possono avere sia una funzione di riempimento all'interno della matrice (diminuendo la porosità del calcestruzzo, aumentano i valori di modulo di Young  $E$  e resistenza meccanica) che una capacità legante (reagendo con acqua o con prodotti di idratazione del clinker per formare idrati stabili).

L'obiettivo principale di Habert e Roussel nel loro studio, non era quello di approfondire i processi di sostituzione del clinker già ampiamenti studiati, ma di proporre un primo passo verso l'associazione dei costi ambientali e dei requisiti prestazionali nella progettazione del mix-design del calcestruzzo. D'altro canto, esistono attualmente diversi software in grado di supportare gli ingegneri a definire varie mescole di calcestruzzo tenendo conto della sostenibilità, ma, le opzioni di mix-design non sono ben estese e non vengono presentate implicazioni sulle performance del prodotto finito, come la durabilità o la resistenza meccanica.

### 3.1.2 MATERIAL PERFORMANCE STRATEGY

La seconda strategia, invece, si incentra sulla riduzione della quantità totale di calcestruzzo, anziché sulla riduzione della quantità di anidride carbonica emessa per tonnellata di calcestruzzo prodotto, aumentandone le caratteristiche meccaniche e quindi riducendone il volume necessario. Tuttavia, Habert e Roussel sostengono che, l'aumento di resistenza meccanica senza alcuna sostituzione porta nella maggior parte dei casi ad un incremento di emissioni di CO<sub>2</sub> per metro cubo di materiale prodotto.

Di seguito viene riportato un grafico nel quale le resistenze meccaniche di varie miscele di calcestruzzo sono espresse in funzione delle rispettive emissioni di anidride carbonica prodotte, per unità di volume.

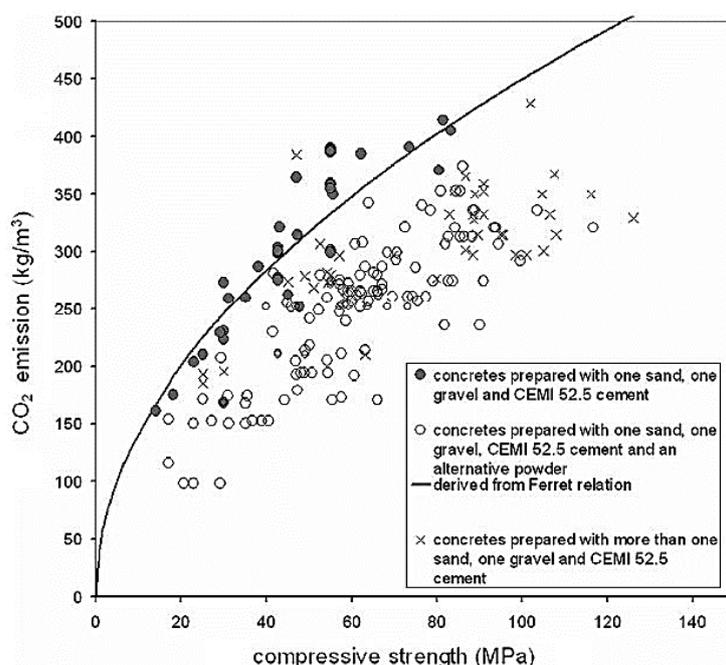


Figura 9 - Emissioni di CO<sub>2</sub> per metro cubo di calcestruzzo in funzione della resistenza a compressione dopo 28 giorni di stagionatura.

Si può notare come la resistenza meccanica del calcestruzzo risulti essere una funzione proporzionale alla potenza di 2 sia della quantità di cemento (già noto, relazione di Ferret (De Larrard, 1999)), che per la quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> emesse, secondo la relazione:

$$f_c \approx (CO_2^{m^3})^2$$

dove:

- $f_c$ : resistenza meccanica del calcestruzzo, espressa in MPa;
- $CO_2^{m^3}$ : metri cubi di anidride carbonica emessi, per unità di volume di calcestruzzo.

Questa relazione dimostra di essere in grado di descrivere i risultati ottenuti da miscele contenenti un solo tipo di inerte ghiaioso, un tipo di aggregato sabbioso e un unico tipo di cemento (CEM I, nello studio).

Si nota, inoltre, che l'aumento del numero di classi granulari consente un incremento della resistenza meccanica ad un dato livello di emissioni di CO<sub>2</sub> o, in maniera equivalente, una diminuzione di emissioni per una data resistenza meccanica. Tale diminuzione, però, varia molto a seconda della natura delle aggiunte minerali e dalla loro quantità (si osservi la forte dispersione dei risultati dovuta alla grande varietà di aggiunte minerali utilizzate).

### 3.1.3 CONCLUSIONI DELLO STUDIO

È stato stimato che, in Francia, utilizzando la sola strategia di sostituzione del clinker con aggiunte minerali, si potrebbe raggiungere una riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> pari al 25 % rispetto ai calcestruzzi "tradizionali", mentre, tramite il solo incremento di prestazioni meccaniche del calcestruzzo al fine di ridurre il volume, si otterrebbe un'ulteriore riduzione dell'ordine del 30 %.

In riferimento al grafico in Figura 9, si può ancora notare come sia possibile combinare entrambe le strategie, portando a una riduzione di emissioni di CO<sub>2</sub> complessiva pari a circa il 40 % (15 % per la sostituzione e 30 % per l'incremento di resistenza meccanica). Stando ai risultati ottenuti da Habert e Roussel, si può notare come l'utilizzo combinato di queste due strategie non sia così lontano dagli obiettivi richiesti dall'Unione Europea (riduzione del 20 % di emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990).

Lo studio sperimentale condotto dal sottoscritto in questa tesi, partendo dai risultati ottenuti da Habert e Roussel, approfondisce il calcolo agli stati limite delle strutture in calcestruzzo armato dal punto di vista ambientale, sviluppando un modello di calcolo e riportando alcuni casi di studio sulla quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte a seconda delle variabili considerate (Capitolo 4).

### 3.2 LE CENERI VOLANTI

Le ceneri volanti (*fly ashes*) sono polveri ottenute dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche. Queste ceneri, prodotte in grande quantità, possono essere definite come una pozzolana artificiale e come tale vengono utilizzate per confezionare il calcestruzzo.

La pozzolana può essere definita come ogni sostanza silicea o silico-alluminosa che in presenza d'acqua è in grado di reagire con l'idrossido di calcio, prodotto nella reazione di idratazione del cemento, formando composti cementati. La silice viene chiamata, in questi casi, silice attiva.

Perché un materiale abbia un'attività pozzolanica è necessario che:

- sia presente in misura sufficiente la silice;
- questa non sia in forma cristallina ma amorfa;
- la superficie specifica sia molto spina in modo da entrare in contatto con la soluzione acquosa in cui è presente l'idrossido di calcio.

Di seguito viene riportata una classificazione dei materiali pozzolanici utilizzati in genere nella produzione del calcestruzzo.

Tabella 2 - Classificazione materiali pozzolanici

Pozzolane moderne	Artificiali	Loppa di altoforno
		Fumo di silice
		<b>Ceneri volanti (da carbone)</b>
Pozzolane antiche	Artificiali	Argilla cotta e macinata
	Naturali	Origine clastica
		Origine vulcanica

Le ceneri volanti non possiedono capacità leganti autonome ma, se mescolate con calce, si comportano da legante. Hanno effetti positivi sul calcestruzzo indurito, consentendo un ulteriore incremento delle resistenze meccaniche anche oltre i 28 giorni di stagionatura, riducendo i fenomeni di creep e incrementando la durabilità. Quest'ultima, in particolare, viene incrementata notevolmente, non solo in virtù della reazione pozzolanica che le ceneri volanti generano nel calcestruzzo con i cementi Portland, ma anche in virtù dell'apporto alla curva granulometrica che diviene così molto più "chiusa", generando una minimizzazione della porosità capillare. Tutti i calcestruzzi contenenti ceneri volanti hanno inferiore permeabilità all'acqua, avendo una inferiore

porosità aperta e una maggiore resistenza all'attacco chimico e, di conseguenza, tendono a saturarsi più difficilmente.

Le ceneri volanti contribuiscono al rallentamento della presa nelle prime ore: questa caratteristica è preziosa laddove si presentino getti massivi e/o nella stagione estiva. Questo fenomeno di leggero ritardo consente una migliore idratazione del cemento riducendo le fessurazioni o i fenomeni di spolvero superficiale. Tutto questo senza alterare le proprietà tipiche dei cementi Portland, quali ad esempio la capacità di sviluppare alte resistenze già alle brevi stagionature.

Infine, svolgendo una parziale funzione legante, le fly ashes contribuiscono in modo evidente alla formazione di paste maggiormente adesive, caratterista quest'ultima utile nel rendere il calcestruzzo più viscoso e meno propenso alla segregazione oltre che al contenimento del dosaggio di cemento all'interno del mix-design.

### 3.2.1 ORIGINE DELLE CENERI VOLANTI

Durante la combustione del carbone in una centrale termoelettriche, le impurità minerali, quali quarzo, feldspato e argilla, presenti assieme al carbone, a causa dell'alta temperatura raggiunta nella combustione (circa 1500 °C), fondono e vengono trascinate dai fumi sotto forma di piccole gocce. Queste, durante il rapido raffreddamento a 200 °C, solidificano e in parte si agglomerano formando particelle sferoidali.

In media bruciando carbone si ottiene, per unità di volume, il 15 % di ceneri volanti. Una quota parte di queste (circa il 10/15 %) precipitano sul fondo della camera di combustione come grossi granuli aventi dimensioni fino a qualche centimetro (denominate appunto *bottom ash*, cenere di fondo). La restante parte (circa l'80 %) viene invece trascinata dai fumi della combustione dai quali poi viene separata da un filtro prima che questi siano espulsi come gas esausti in atmosfera. Solo la frazione di particelle più piccole costituisce le fly ashes utilizzabili, mentre la cenere di fondo, pesante, a causa delle sue dimensioni non possiede caratteristiche pozzolaniche, per cui non viene utilizzata.

Le fly ashes sono particelle sferiche di diametro compreso tra meno di 1 micron e 200 micron (generalmente, hanno dimensioni inferiori ai 45 micron), sono di natura prevalentemente silico-alluminosa e presentano una struttura vetrosa a causa del brusco raffreddamento che impedisce la cristallizzazione delle gocce liquide formate nella camera di combustione.

I primi tentativi di impiego delle ceneri volanti come pozzolana all'interno del mix-design dei calcestruzzi risale agli anni '30, quando negli Stati Uniti si iniziò a bruciare carbone polverizzato. Solo negli anni '50 ci furono le prime importanti applicazioni su vasta scala nelle opere in cemento

armato e, negli anni '70, la crisi energetica e gli alti costi del petrolio favorirono l'aumento di utilizzo di carbone e la conseguente produzione di ceneri volanti.

### 3.2.2 COMPOSIZIONE CHIMICA

Dal punto chimico la cenere volante viene classificata, secondo ASTM C 618, in base al contenuto dei costituenti principali  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ . Di seguito, vengono riportati i limiti secondo i quali la norma classifica le due classi di ceneri.

Tabella 3 - Classificazione delle ceneri volanti secondo ASTM C 618

Tipo di cenere	Quantità di $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$
F	> 70 %
C	>50 %

Tabella 4 - Composizione chimica in percentuale delle ceneri volanti di tipo F e C

Combustibile di provenienza	Tipo di cenere volante secondo ASTM	Composizione chimica (%) della cenere							
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	CaO	MgO	$\text{SO}_3$	$\text{Na}_2 + \text{K}_2\text{O}$	paf*
Antracite carbone bituminoso	F	44	28	9	4	2	1	1.5	7
Lignite carbone sub-bituminoso	C	36	22	4	24		3	2.5	1

\* perdita al fuoco

La maggior parte delle ceneri disponibili in Italia si ottengono dalla combustione di lignite, risultando, quindi, di tipo F. Esse presentano prevalentemente una fase vetrosa (può arrivare fino a circa l'80 %) mentre, la restante parte, è caratterizzata da una ben definita fase cristallina.

Tabella 5 - Composizione cristallina delle ceneri volanti di tipo F e C

Tipo di cenere secondo ASTM	Fase vetrosa (%)	Componenti cristallini (%)	Tipo di composti cristallini
F	80	20	Quarzite Mullite Sillimanite Magnetite Ematite
C	80	20	Alluminato tricalcico Solfato tricalcio Solfoalluminato di calcio Calce quarzite

### 3.2.3 DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA

Le ceneri volanti sono caratterizzate da una distribuzione granulometrica molto simile rispetto a quella dei più diffusi cementi Portland, con una dimensione che va da 1 micron fino ad un massimo di 200 micron. Non si registrano sensibili variazioni dimensionali tra le tipologie F e C delle polveri che, in ogni caso, sono prodotti molto variabili sia in composizione che in dimensioni fisiche, a seconda della propria origine. Di conseguenza, una loro generalizzazione ha il solo scopo di definire il ruolo delle polveri all'interno dei mix-design del calcestruzzo.

A titolo di esempio, viene riportata di seguito una comparazione tra una tipica curva granulometrica dei grani di un cemento Portland 3.25 e quelle relative alle due tipologie F e C di ceneri volanti.

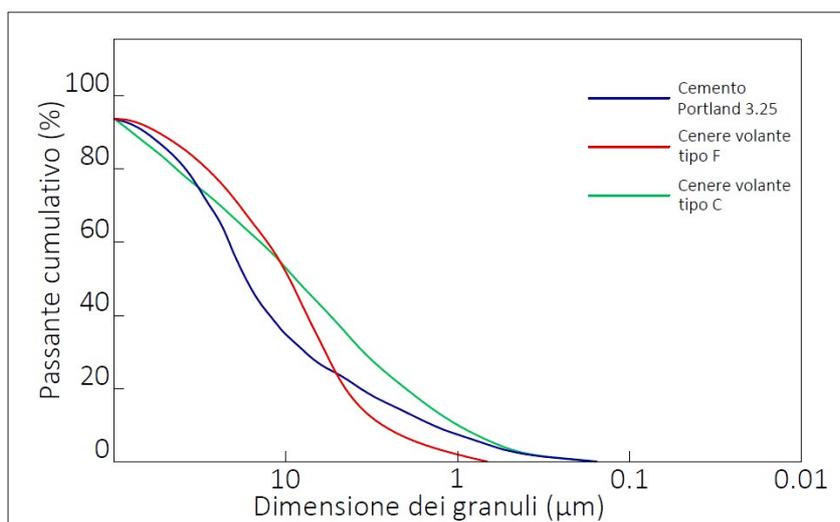


Figura 10 - Comparazione curve granulometriche: ceneri volanti di tipo C, tipo F e cemento Portland 3.25

I grani delle ceneri volanti presentano normalmente un aspetto sferoidale ma non mancano grani con forme leggermente differenti sia in forma che in dimensioni: quest'ultime si formano dopo una collisione delle goccioline di cenere liquida con frammenti grossolani di carbone incombusto durante il loro trascinarsi nei fumi della combustione. Le particelle più grandi in parte tendono a fondersi assumendo una forma tondeggiante, ed in parte rimangono nella loro forma irregolare anche dopo il raffreddamento.<sup>13</sup>

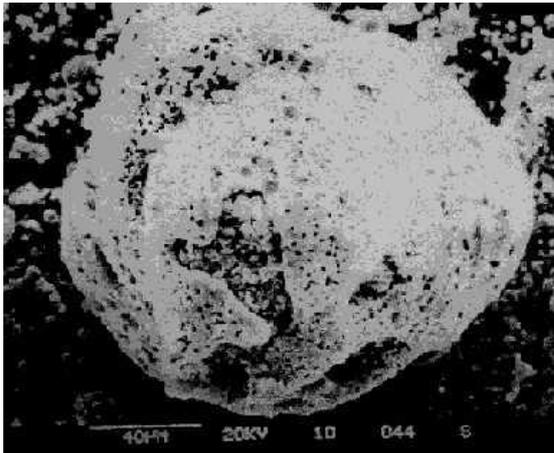


Figura 11 – Microfotografia al microscopio elettronico a scansione delle particelle di cenere volante. Particelle tondeggianti ma non sferiche.

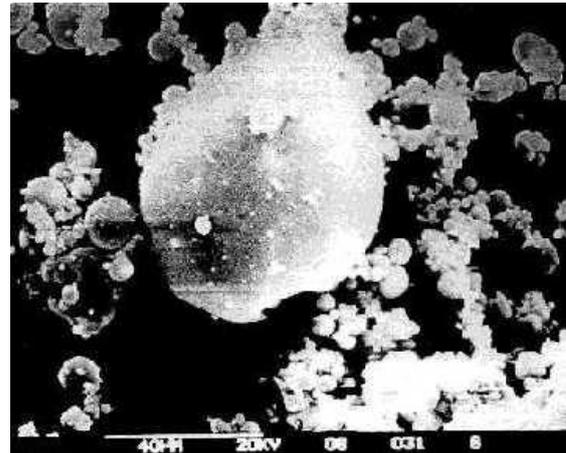


Figura 12 - Microfotografia al microscopio elettronico a scansione delle particelle di cenere volante. Prevalenza di particelle sferiche.

<sup>13</sup> <http://digilander.libero.it/TEXAS76/4.htm>

### 3.2.4 NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La normativa di riferimento per le ceneri volanti è la UNI EN 450. Questa norma europea stabilisce i requisiti per le caratteristiche chimiche e fisiche delle polveri, nonché i procedimenti per il controllo di qualità delle stesse, che possono essere poi utilizzate in tutta sicurezza come aggiunta pozzolanica per la produzione di calcestruzzo strutturale prefabbricato o gettato in opera. Invece, si fa riferimento alla EN 206 per le disposizioni in ambito d'utilizzo delle ceneri.

Le principali prove previste, e le relative norme di riferimento, sono riportate in seguito.

*Tabella 6 - Elenco delle principali prove e relative norme di riferimento per le ceneri volanti*

Caratteristiche chimico-fisiche	Norma procedurale	Valore limite ammesso
Perdita al fuoco (%)	EN 196-2	≤ 5.0 - 7.0
Cloruri (Cl <sup>-</sup> )	EN 196-21	≤ 0.1
Solfati (So <sub>3</sub> ) (%)	EN 196-2	≤ 3.0
Calce libera (CaO)	EN 451-1	≤ 1.0 ≤ 2.5
Espansività (mm)	EN 196-3	≤ 10.0
Finezza (residuo a 45 μm ad umido) (%)	EN 451-2	≤ 40.0
Indice di pozzolanità (%)	EN 196-1	≥ 75.0 a 28 gg ≥ 85.0 a 90 gg
Massa volumica (kg/m <sup>3</sup> )	EN 196-6	Valore medio ± 150

## **CAPITOLO 4. DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO**

## 4.1 INTRODUZIONE

In genere, le travi isostatiche in cemento armate sono progettate in modo tale da rispondere ai requisiti degli stati limite (secondo EuroCodice 2).

L'obiettivo principale del presente lavoro di tesi è produrre un modello di calcolo per il progetto delle strutture in c.a. che tiene conto non solo delle disposizioni dell'EC2 in materia di stati limite e deformazione, ma anche dell'impatto ambientale provocato in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte.

In accordo con gli studi di Habert e Roussel (paragrafo 3.1), è possibile incrementare la sostenibilità delle strutture in calcestruzzo applicando le strategie di sostituzione e di incremento delle performance, combinandole tra loro. Secondo Habert e Roussel, l'incremento di CO<sub>2</sub> emessa, per metro cubo di calcestruzzo prodotto, è determinabile tramite la seguente relazione:

$$\beta_0 = \delta \sqrt{f_{co}} \quad (1)$$

dove:

- $\beta_0$  è la quantità di CO<sub>2</sub> emessa per la produzione di un metro cubo di calcestruzzo;
- $f_{co}$  è la resistenza del calcestruzzo;
- $\delta$  è un coefficiente di correlazione.

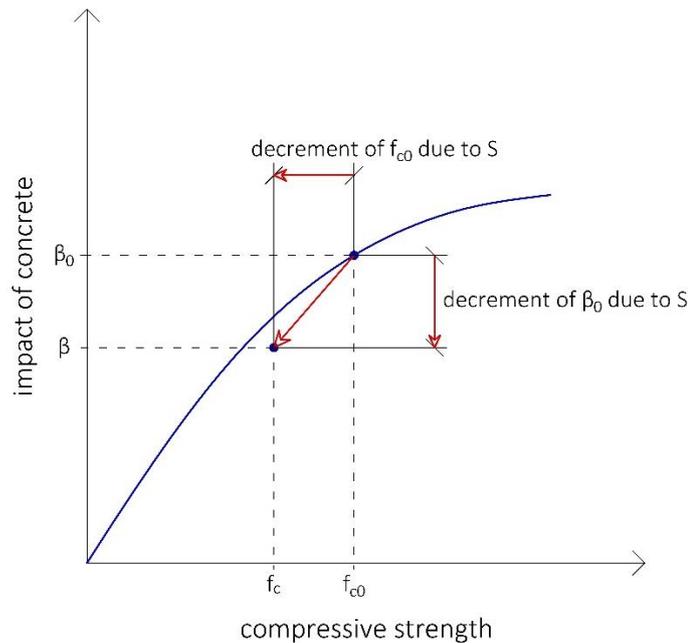
Per una nota miscela di calcestruzzo, avente specifici di valori di  $f_{co}$  e  $\beta_0$ , si può notare una loro diminuzione all'aumentare di sostituzione del clinker con fly ashes (Figura 13). I nuovi parametri ottenuti sono quindi funzioni della percentuale di sostituzione delle ceneri volanti e dai parametri iniziali  $f_{co}$  e  $\beta_0$ , riportate qui di seguito.

$$f_{co} = (1 + \alpha \cdot S) f_{co} \quad (2)$$

$$\beta_{co} = (1 + \gamma \cdot S) \beta_{co} \quad (3)$$

dove:

- $\alpha$  è il coefficiente di resistenza (strenght coefficient);
- $\gamma$  è il coefficiente di sostenibilità (sustainability coefficient);
- $S$  è la percentuale di sostituzione del clinker con fly ashes.

Figura 13 – Diagramma  $\beta$ - $f_c$ 

Per ogni specifico mix-design di calcestruzzo, i coefficienti  $\delta$ ,  $\alpha$  e  $\gamma$ , sono ricavabili attraverso prove in laboratorio. Di seguito viene riportata la procedura secondo la quale, è possibile determinare i valori di tali coefficienti. In particolare, sono stati utilizzati i risultati del test di (Lam L., 1998)<sup>14</sup> sugli effetti della sostituzione di ceneri volanti e fumi di silice sulla resistenza meccanica del calcestruzzo.

Tabella 7 - Caratteristiche fisiche dei provini utilizzati nel test di Lam et al. (1998)

Details of concrete mixes.									
Mix	W/CM	Fly ash, %	Silica fume, %	Mix proportion, kg/m <sup>3</sup>				HRWRA L/m <sup>3</sup>	$f'_c$ 28
				Total cementitious materials	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water		
S1-0-0	0.3	0	0	500	724	1086	150	7.5	82.5
S1-15-0	0.3	15	0	500	700	1086	150	7.5	77.9
S1-25-0	0.3	25	0	500	683	1086	150	9.25	79.1
S1-45-0	0.3	45	0	500	650	1086	150	10.5	64.0
S1-55-0	0.3	55	0	500	634	1086	150	13.0	57.1
S2-0-0	0.4	0	0	400	710	1157	160	4	55.8
S2-15-0	0.4	15	0	400	690	1157	160	4.4	44.8
S2-25-0	0.4	25	0	400	660	1157	160	4.8	44.1
S2-45-0	0.4	45	0	400	634	1157	160	5.2	32.7
S2-55-0	0.4	55	0	400	621	1157	160	6.4	32.4
S3-0-0	0.5	0	0	410	609	1132	205	0	42.6
S3-15-0	0.5	15	0	410	589	1132	205	0	38.1
S3-25-0	0.5	25	0	410	576	1132	205	0	35.2
S3-45-0	0.5	45	0	410	549	1132	205	0	30.4
S3-55-0	0.5	55	0	410	536	1132	205	0	25.9

<sup>14</sup> "Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete", Lam, Wong e Poon, 1998

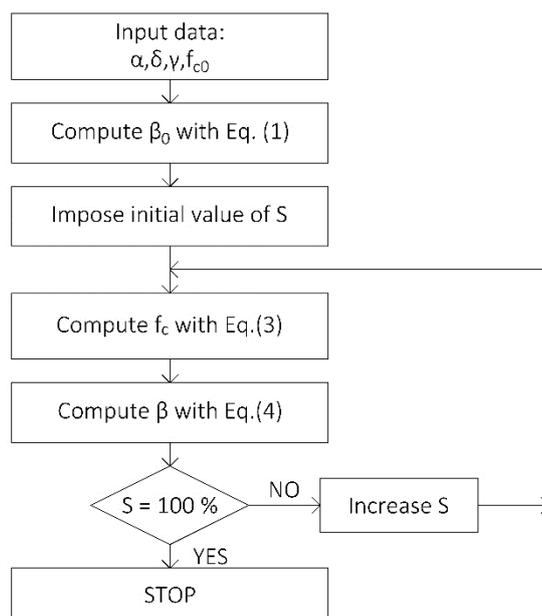
Tabella 8 - Quantità di CO<sub>2</sub> emessa per unità di massa, dai componenti del calcestruzzo (Chiaia, 2014)**Ecological performances of concrete components.**

	Unit	GWP (kg CO <sub>2</sub> )
<i>Raw material</i>		
Cement Type I 52.5	kg	0.83237
Ground limestone	kg	0.01905
Fly ash	kg	-
Silica fume	kg	-
Aggregates	kg	0.00246
Steel	kg	1.4965
Water	kg	0.000318
<i>Admixture</i>		
Superplasticizer	kg	0.72
Air entraining	kg	0.086
Retarder	kg	0.076
Waterproofed	kg	0.25

Attraverso un'analisi di regressione dei dati di input riportati in Tabella 7 e Tabella 8, sono stati ottenuti i seguenti valore dei coefficienti:

- $\delta = 48,088 \text{ kgCO}_2/(\text{m}^3 \text{ MPa}^{0.5})$
- $\frac{\alpha}{100} = -0,006732$
- $\frac{\gamma}{100} = -0,009731$

Questi parametri sembrano essere indipendenti dal rapporto acqua/cemento utilizzato. Viene riportata la procedura di calcolo per la costruzione delle curve  $f_c$ - $S$  e  $\beta$ - $S$ , illustrate di seguito in Figura 15, utilizzando le tre categorie di provini analizzate nel test di (Lam L., 1998).

Figura 14 - Algoritmo di calcolo per la definizione delle curve  $f_c$ - $S$  e  $\beta$ - $S$

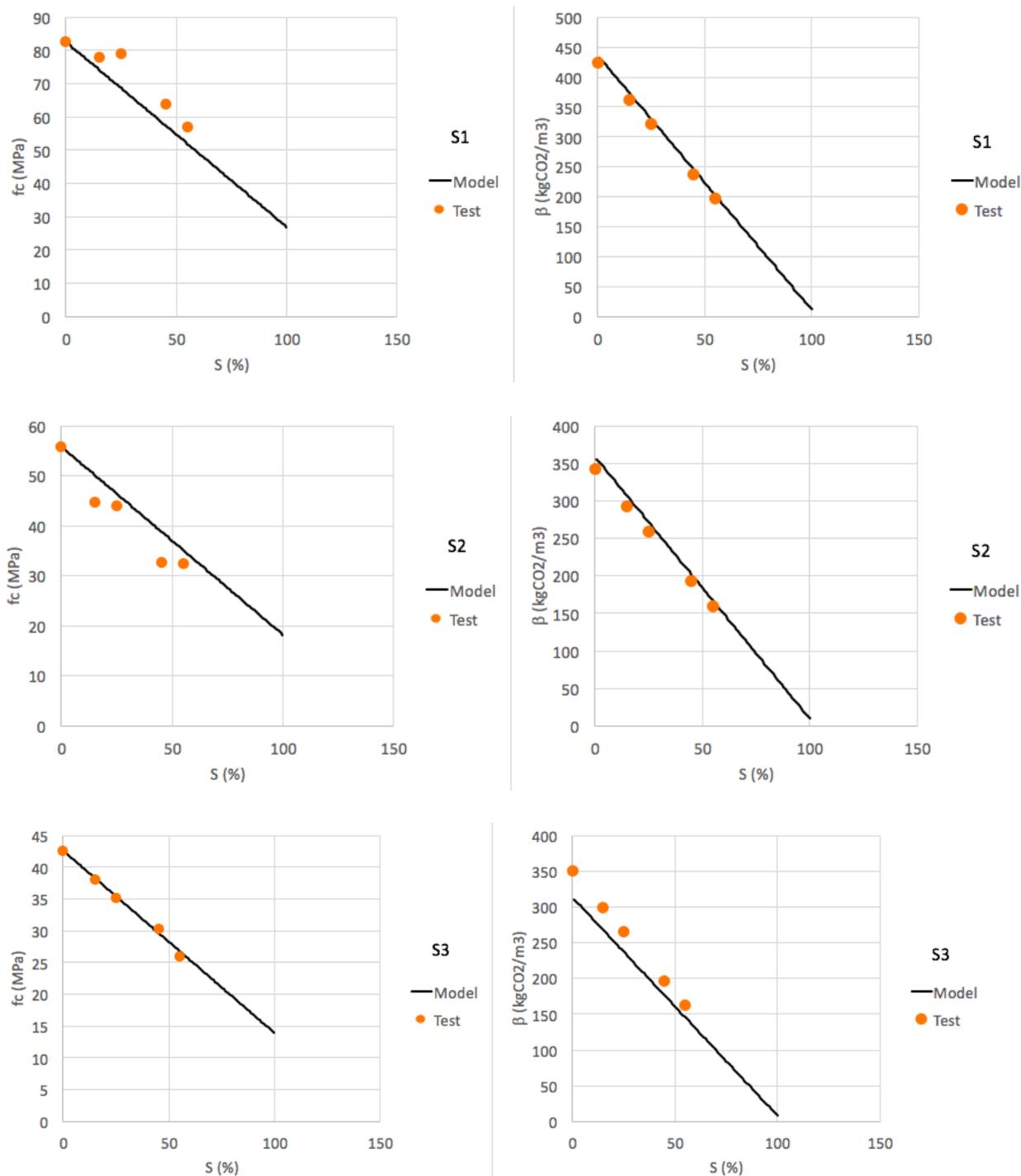


Figura 15 – Applicazione dell' algoritmo di calcolo alle tre categorie di provini del test di Lam et al. (1998)

Il lavoro di tesi del sottoscritto, partendo dai risultati e dalle indicazioni sopra descritte, si sviluppa nel calcolo del consumo in termini di anidride carbonica di una trave semplicemente appoggiata, al variare della percentuale  $S$  di sostituzione con fly ashes, secondo la relazione di Habert e Roussel (Eq.(1)). In tale lavoro, è stato analizzato dapprima il solo caso della flessione, seguito poi con il progetto delle armature a taglio secondo EC2 e sviluppando il modello finale con alcuni casi di studio e confronti.

## 4.2 IL CALCOLO AGLI STATI LIMITE: LA FLESSIONE SEMPLICE

In accordo con l'EC2, il calcolo agli stati limite delle travi in calcestruzzo armato è funzione dei legami costitutivi  $\sigma$ - $\epsilon$  dei materiali utilizzati. Per classi di calcestruzzo minori di C50/60 possono ritenersi validi i seguenti legami costitutivi:

- Calcestruzzo (Figura 16): legame parabola-rettangolo ( $\epsilon_{cu} = 3.5 \text{ ‰}$ );
- Acciaio (Figura 17): legame bilineare elasto-plastico perfetto (per tensioni superiori a quella di snervamento  $f_{yd}$ , lo sforzo rimane costante indipendentemente dal valore di deformazione).

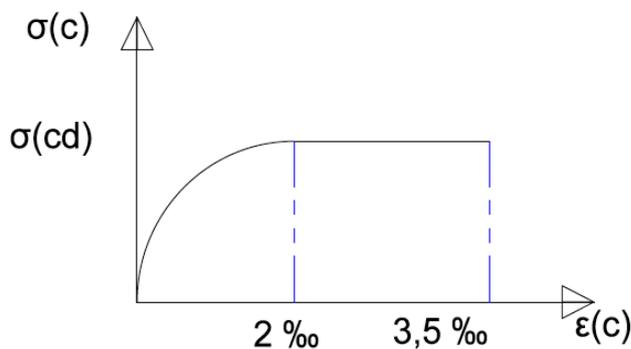


Figura 16 – Diagramma costitutivo parabola-rettangolo del calcestruzzo

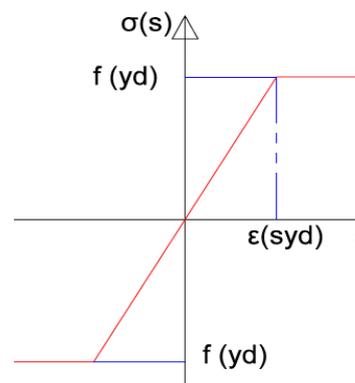


Figura 17 - Diagramma costitutivo bilineare elasto-plastico perfetto dell'acciaio

I valori delle resistenze di progetto di entrambi i materiali sono calcolati in accordo con i coefficienti parziali di sicurezza dati dall'EC2:

$$\sigma_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad (4)$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad (5)$$

dove:

- $\alpha_{cc}$  è il coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata (0.85 in Italia);
- $\gamma_c$  è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo (1.50 in Italia);
- $f_{ck}$  è la resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo a 28 giorni;
- $\gamma_s$  è il coefficiente parziale di sicurezza relativo all'acciaio (1.15 in Italia);
- $f_{yk}$  è la tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio.

In relazione alla sezione presso-inflessa (Figura 18) assieme ai diagrammi costitutivi  $\sigma$ - $\varepsilon$  di cui sopra, la verifica di resistenza allo stato limite ultimo (SLU) si esegue verificando che:

$$M_{Rd} \geq M_{Ed} \quad (6)$$

dove:

- $M_{Rd}$  è il valore di calcolo del momento resistente della sezione presso inflessa;
- $M_{Ed}$  è il valore di calcolo della componente flettente dell'azione.

Quest'ultimo può essere calcolato analiticamente assumendo le condizioni di deformazione limite illustrate in Figura 18. In condizioni ottimali, al fine di assicurare una rottura duttile (cioè con la rottura "lato acciaio"), la sollecitazione massima del calcestruzzo viene raggiunta nel bordo compresso della trave, mentre la deformazione dell'acciaio in tensione è superiore a quella di snervamento ( $\varepsilon_s > \varepsilon_{yd}$ ), in modo da ricadere in campo 3.

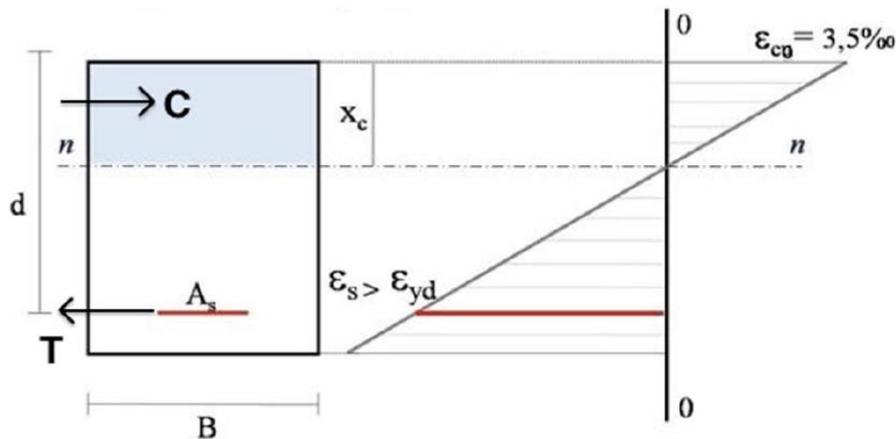


Figura 18 - Comportamento della sezione soggetta a flessione semplice

In queste condizioni ottimali, le condizioni di equilibrio sono le seguenti:

$$\omega = 0.81 \xi \quad (7a)$$

$$\mu_{Rd} = 0.81 \xi (1 - 0.42\xi) \quad (7b)$$

dove:

$$\xi = \frac{x_c}{d} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{A_s f_{yd}}{b d \sigma_{cd}} \quad (9)$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{b d^2 \sigma_{cd}} \quad (10)$$

In genere, le normative tecniche fissano dei valori minimi e massimi per la quantità di armatura longitudinale. Le norme italiane per edifici in zona sismica, prevedono:

$$k_1 \frac{b d}{f_{yk}} \leq A_s \leq k_2 \frac{b d}{f_{yk}} \quad (11)$$

dove  $k_1 = 1,40$  e  $k_2 = 3,50$ .

Quindi, per ridurre le dimensioni della sezione di progetto, si tende a calcolare l'area di armatura longitudinale  $A_s$  facendo riferimento al limite superiore dell'Eq.(11). Ne risulta:

$$\omega = \frac{k_2}{\sigma_{cd} \gamma_s} \quad (12)$$

Sostituendo l'Eq.(12) nell'Eq.(7), è possibile determinare il valore ottimale di  $\xi$ :

$$\xi = \frac{k_2}{0.81 \sigma_{cd} \gamma_s} \quad (13)$$

In accordo con EC2 (§5.6.2), l'analisi plastica per le travi, telai e solai può essere eseguita senza la verifica di duttilità quando  $\xi = 0,25$ , per classi di resistenza del calcestruzzo inferiori a C50/60.

Infine, sostituendo l'Eq.(9) nell'Eq.(12) e l'Eq.(13) nell'Eq.(7b), si ottengono le equazioni del seguente sistema:

$$A_s = \frac{b d k_2}{f_{yd} \gamma_s} \quad (14a)$$

$$M_{Rd} = b d^2 \frac{k_2}{\gamma_s} \left( 1 - 0.42 \frac{k_2}{0.81 \sigma_{cd} \gamma_s} \right) \quad (14b)$$

#### 4.2.1 IL CONTROLLO DELLA DEFORMAZIONE FLESSIONALE

Il calcolo della deformazione flessionale delle strutture inflesse in c.a., non risulta semplice a causa dei differenti momenti d'inerzia della sezione (sezione integra e sezione fessurata). Secondo l'EC2, non è necessario calcolare esplicitamente la deformazione flessionale nelle strutture inflesse in calcestruzzo armato. Basta limitare il rapporto tra altezza della sezione della trave e la sua luce in maniera adeguata per evitare problemi di inflessione delle travi. Ne consegue:

$$\alpha = \frac{H}{L} \quad (15)$$

dove:

- $\alpha$  è un coefficiente;
- $H$  è l'altezza della sezione della trave;
- $L$  è la luce della trave.

### 4.2.2 LA DURABILITÀ E LO SPESSORE DEL COPRIFERRO

La definizione dello spessore di copriferro  $c$  è prettamente un problema di durabilità, e quindi delle condizioni ambientali. Le norme definiscono varie classi di esposizione a seconda del grado di aggressività cui è sottoposta la struttura in cemento armato. Lo spessore di copriferro può essere assunto come frazione dell'altezza della sezione, come di seguito:

$$c = \frac{H}{\rho} \quad (16)$$

dove  $\rho$  è un coefficiente che varia a seconda della classe di esposizione.

### 4.2.3 UN NUOVO MODO DI PROGETTARE LE TRAVI IN C.A.

A questo punto si hanno tutti i dati di input per il progetto di una trave in c.a. semplicemente appoggiata, caricata con un carico distribuito  $q$  per tutta la sua lunghezza.

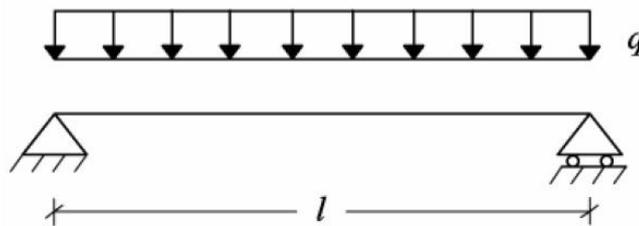


Figura 19 - Schema di calcolo della trave semplicemente appoggiata

Vengono utilizzati i seguenti dati di input:

- $D_e$ : densità del calcestruzzo;
- $f_c$ : resistenza meccanica caratteristica media (valore caratteristico  $f_{ck} = f_c - 8 \text{ MPa}$ );
- $L$ : luce della trave;
- $\alpha$ : coefficiente per il controllo dell'inflessione della trave;
- $\rho$ : coefficiente in funzione della classe di esposizione;
- $d$ : altezza utile della sezione ( $d = H - c$ );
- $q_d$ : carico variabile distribuito.

In queste condizioni, le uniche incognite da calcolare sono la base  $b$  della sezione della trave e l'area di armatura a flessione  $A_s$ . Tali valori dipendono maggiormente dal massimo momento agente sulla struttura. Ponendo  $M_{Rd}$  uguale al massimo momento agente  $M_{Ed}$ , risulta:

$$M_{Rd} = q \frac{L^2}{8} \quad (17a)$$

$$q = (\gamma_{G1} b H De + \gamma_Q q_d) \quad (17b)$$

dove:

- $\gamma_{G1}$  è il coefficiente parziale di sicurezza per i carichi permanenti strutturali;
- $\gamma_Q$  è il coefficiente parziale di sicurezza per i carichi variabili,

rispettivamente pari a 1,30 e 1,50.

Infine, sostituendo l'Eq.(17) nell'Eq.(14b) è possibile ottenere la dimensione di base  $b$  della sezione come:

$$b = \frac{\gamma_Q q_d L^2}{\left[ 8 (H-c)^2 \frac{k_2}{\gamma_s} \left( 1 - 0.42 \frac{k_2}{0.81 \sigma_{cd} \gamma_s} \right) - \gamma_{G1} H De L^2 \right]} \quad (18)$$

e l'area dell'armatura longitudinale  $A_s$  tramite l'Eq.(14a).

L'impatto globale della trave  $BI$ , in termini di CO<sub>2</sub> rilasciata in atmosfera risulta pari a:

$$BI = [\beta (b H - A_s) + \varphi A_s] L \quad (19)$$

$$\varphi = GWP_s \cdot De_s \quad (20)$$

dove:

- $GWP_s$  è il coefficiente di performance ambientale dell'acciaio, ricavabile dalla Tabella 8 (paragrafo 4.1);
- $De_s$  è la densità dell'acciaio.

#### 4.2.4 APPLICAZIONE DEL MODELLO "A"

Tramite la procedura di calcolo mostrata in Figura 20, sono state costruite le funzioni di  $S$ ,  $f_{co}$  e  $BI$  di una trave in calcestruzzo semplicemente appoggiata, avente come dati di input:

- $\delta = 48,088 \text{ kgCO}_2 / (\text{m}^3 \text{ MPa}^{0.5})$
- $\alpha/100 = -0,006732$
- $\gamma/100 = -0,009731$
- $L = 5000 \text{ mm}$
- $De = 25,00 \text{ kN/m}^3$
- $q_d = 46,50 \text{ kN/m}$
- $k_2 = 3,50$
- $\varphi = 1174,525 \text{ KgCO}_2 / \text{m}^3$

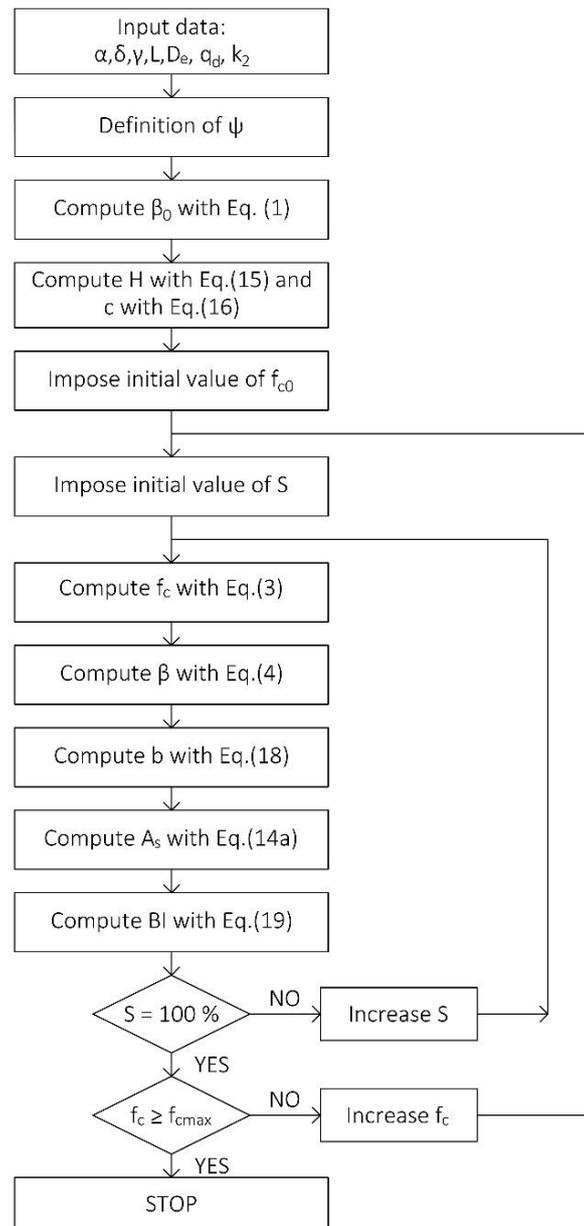


Figura 20 - Algoritmo di calcolo per la definizione del diagramma  $S$ - $f_c$ - $BI$  del modello "A"

Di seguito viene riportato il Diagramma  $S$ - $f_c$ - $BI$  della trave caso di studio.

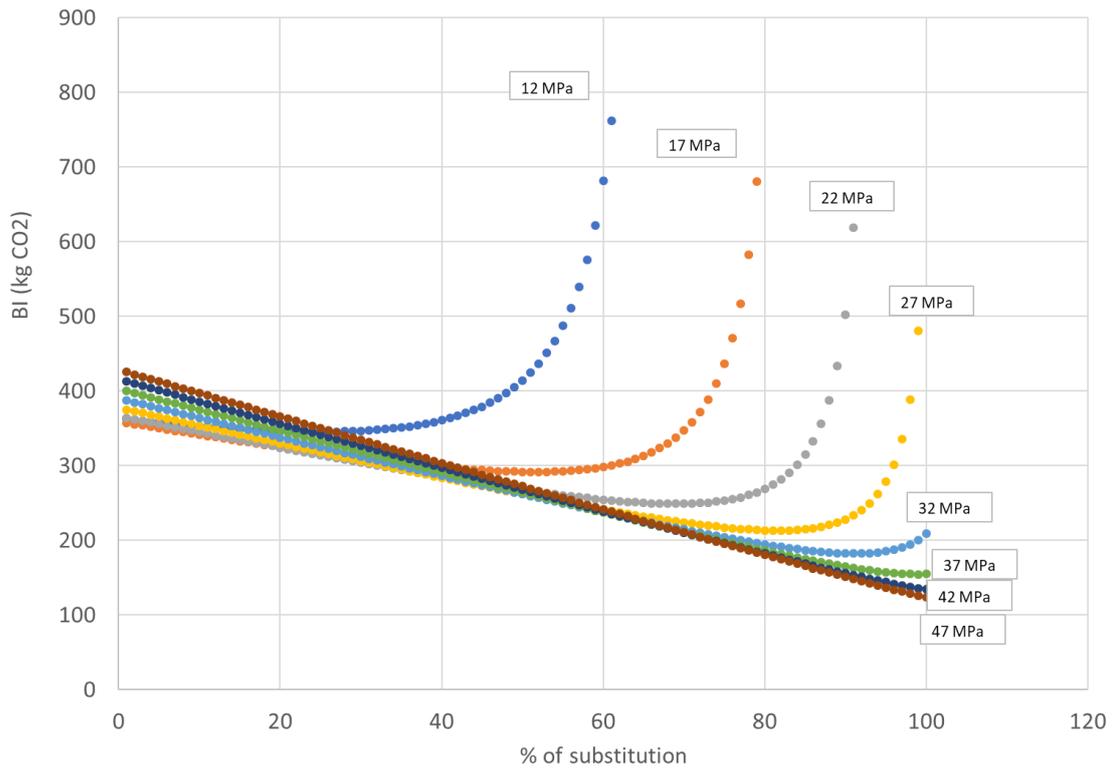
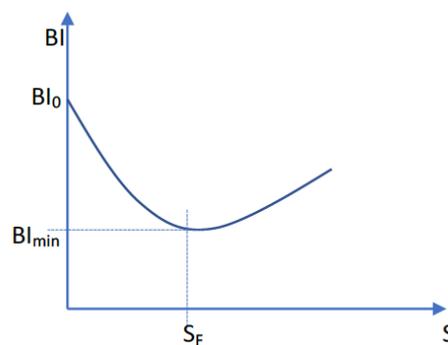


Figura 21 – Diagramma  $S$ - $f_{co}$ - $BI$ , modello "A"

#### 4.2.5 ANALISI DEI RISULTATI – MODELLO "A"

I risultati dello studio precedentemente descritto, portano alle seguenti conclusioni:

- Per una data resistenza iniziale  $f_{co}$ , l'impatto della trave in calcestruzzo ha un valore minimo ( $BI_{min}$ ) in corrispondenza della percentuale di sostituzione  $S_F$  (quest'ultima compresa tra 0 % e 100 % e varia a seconda della resistenza  $f_{co}$ ). Quando  $S < S_F$ , l'impatto risulta maggiore di  $BI_{min}$  a causa dell'alto contenuto di clinker, nonostante le dimensioni della trave risultino minori. Quando  $S > S_F$ , l'impatto è maggiore a causa del maggior quantitativo di calcestruzzo (e acciaio) a causa dell'alto tasso di sostituzione di ceneri volanti e conseguente riduzione di resistenza meccanica del calcestruzzo.



- L'impatto iniziale  $Bl_o$  risulta maggiore all'incrementare della resistenza meccanica iniziale  $f_{co}$ . Tuttavia, il minimo relativo  $Bl_{min}$  si sposta verso tassi di sostituzione  $S$  più elevati e diminuisce con l'aumentare di  $f_{co}$ .

Pertanto, risulta più conveniente utilizzare calcestruzzi con valore di resistenza meccanica  $f_{co}$  elevata e massimizzare in essi il tasso di sostituzione del clinker  $S$  con le ceneri volanti.

#### 4.2.6 DEFINIZIONE $A_{S_{MIN}}$ E DISTINTA DEI FERRI LONGITUDINALI

Precedentemente al calcolo delle armature resistenti a taglio, è stato ritenuto opportuno ridefinire in maniera più dettagliata la quantità di armatura longitudinale  $A_s$  disposta nelle varie sezioni di trave. La suddetta quantità di armatura è stata finora dimensionata per resistere al massimo momento agente sulla trave (Eq.(17a)), risultando quindi necessaria solo nelle sezioni maggiormente sollecitate (in prossimità della mezzeria).

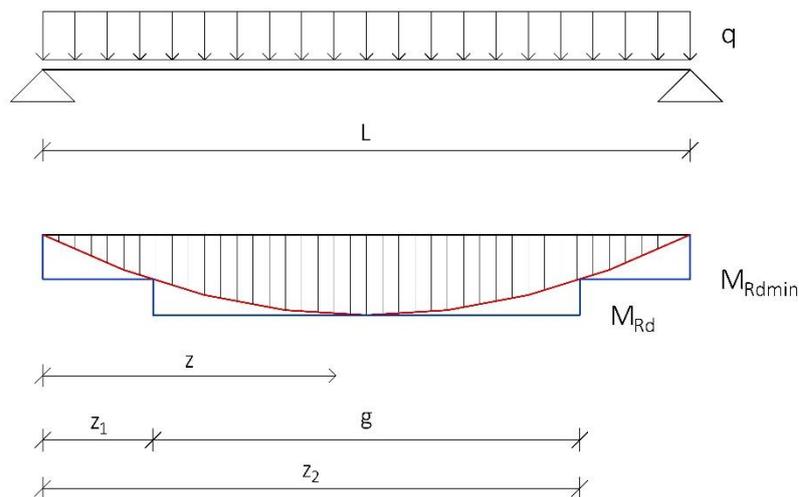


Figura 22 - Diagramma momenti flettenti dello schema di trave considerato

In riferimento all'Eq.(11), è stata calcolata la quantità di armatura longitudinale minima  $A_{smin}$  secondo la seguente relazione:

$$A_{smin} = \frac{b d k_1}{f_{yd} \gamma_s} \quad (21)$$

con  $k_1 = 1,40$ .

Di conseguenza, è possibile definire il valore di momento resistente associato alla quantità di armatura  $A_{smin}$ , definendo dapprima:

$$\xi_{min} = \frac{k_1}{0.81 \sigma_{cd} \gamma_s} \quad (22)$$

$$\omega_{min} = \frac{k_2}{\sigma_{cd} \gamma_s} \quad (23)$$

Analogamente a quanto sostituito nell'Eq.(14b), si ricava la seguente espressione di  $M_{Rdmin}$ :

$$M_{Rdmin} = b d^2 \frac{k_1}{\gamma_s} \left( 1 - 0.42 \frac{k_1}{0.81 \sigma_{cd} \gamma_s} \right) \quad (24).$$

Infine si calcola la distanza in prossimità degli appoggi nella quale non è necessario disporre una quantità di armatura  $A_s$ , bensì risulta sufficiente l'armatura longitudinale minima  $A_{smin}$  calcolata (Eq.(21)). Conoscendo la legge di variazione del diagramma di momento flettente agente al variare dell'ascissa  $z$ , è possibile determinare, in accordo con la simbologia utilizzata in Figura 22, i valori di  $z_1$  e  $z_2$ :

$$z_1 = \frac{qL - \sqrt{qL^2 - 8 q M_{Rdmin}}}{2q} \quad (25a)$$

$$z_2 = \frac{qL + \sqrt{qL^2 - 8 q M_{Rdmin}}}{2q} \quad (25b)$$

In definitiva, nei due tratti di trave prossimi agli appoggi ( $z = z_1$  e  $z = L - z_2$ ), è possibile disporre l'armatura  $A_{smin}$ , mentre nel restante tratto di campata  $g$  ( $g = z_2 - z_1$ ) è necessario disporre una quantità di armatura longitudinale, tale da resistere al massimo momento agente  $M_{Ed}$ , pari a  $A_s$ .

#### 4.2.7 DEFINIZIONE DI $A'_s$

È stata inoltre definita la quantità di armatura in zona compressa  $A'_s$  in accordo con le NTC08 (§7.4.6.2.1), rispettando le seguenti limitazioni:

$$\rho' \geq 0.50 \rho \text{ in zona critica} \quad (26a)$$

$$\rho' \geq 0.25 \rho \text{ nelle altre zone} \quad (26b)$$

dove:

- $\rho' = \frac{A'_s}{bH}$  è la percentuale geometrica di armatura compressa;
- $\rho = \frac{A_s}{bH}$  è la percentuale geometrica di armatura tesa.

### 4.3 IL CALCOLO AGLI STATI LIMITE: LO SFORZO DI TAGLIO

In accordo con le NTC08 (§4.1.2.1.3.2), la resistenza a taglio di elementi strutturali dotati di specifica armatura a taglio deve essere valutata sulla base di una adeguata schematizzazione a traliccio. Gli elementi resistenti dell'ideale traliccio sono le armature trasversali, le armature longitudinali, il corrente compresso di calcestruzzo e i puntoni d'anima inclinati. L'inclinazione  $\theta$  dei puntoni di calcestruzzo rispetto all'asse della trave deve rispettare la seguente prescrizione:

$$1 \leq \cot g\theta \leq 2.5 \quad (27)$$

La verifica di resistenza a Stato Limite Ultimo si pone:

$$V_{Rd} \geq V_{Ed} \quad (28)$$

dove:

- $V_{Rd}$  è lo sforzo di taglio resistente della sezione;
- $V_{Ed}$  è lo sforzo di taglio agente nella sezione.

Il valore massimo dello sforzo di taglio agente, di una trave semplicemente appoggiata avente una configurazione di carico come da Figura 19, risulta essere pari a

$$V_{Ed} = \frac{qL}{2} \quad (29).$$

La resistenza di calcolo a "taglio compressione" e "taglio trazione" sono definite rispettivamente mediante le seguenti relazioni:

$$V_{Rcd} = \frac{0,9b_w d \alpha_c \sigma_{cd} (\cot g\alpha + \cot g\theta)}{2(1 + \cot g^2\theta)} \quad (30)$$

$$V_{Rsd} = 0,9d f_{yd} \frac{A_{sw}}{s} (\cot g\alpha + \cot g\theta) \sin \alpha \quad (31)$$

dove:

- $b_w$  è la dimensione trasversale della sezione di calcestruzzo;
- $d$  è l'altezza utile della sezione di calcestruzzo;
- $\alpha_c$  è un coefficiente maggiorativo pari a
  - 1 per membrane non compresse
  - $1 + \sigma_{cp}/f_{cd}$  per  $0 \leq \sigma_{cp} < 0.25f_{cd}$

- 1.25 per  $0.25f_{cd} \leq \sigma_{cp} \leq 0.50f_{cd}$
- $2.5(1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$  per  $0.50f_{cd} < \sigma_{cp} < f_{cd}$
- $\alpha$  è l'angolo inclinazione dell'armatura trasversale rispetto all'asse della trave;
- $A_{sw}$  è l'area dell'armatura trasversale;
- $s$  è l'interasse tra due armature trasversali consecutive.

#### 4.3.1 PROGETTO DELL'ARMATURA TRASVERSALE

Essendo noti:

- lo sforzo di taglio agente definito mediante l'Eq.(29)  $V_{Ed}$ ;
- la geometria della sezione resistente;
- la quantità dell'area dell'armatura trasversale  $A_{sw}$  (si impone il diametro dei ferri da utilizzare come staffatura);
- le proprietà meccaniche dei materiali,

è possibile definire il passo  $s$  delle armature trasversali.

Calcolati i valori di  $V_{Rcd1}$  ( $\cotg\theta = 1$ ) e  $V_{Rcd2}$  ( $\cotg\theta = 2,5$ ) rispettivamente pari al massimo e al minimo valore di sforzo di taglio resistente (lato "taglio compressione") è possibile trovarsi davanti ad una delle tre seguenti condizioni:

- 1)  $V_{Ed} > V_{Rcd1} \rightarrow$  la sezione non è in grado di resistere allo sforzo di taglio agente;
- 2)  $V_{Ed} < V_{Rcd2} \rightarrow$  si dispone una staffatura tale che  $V_{Ed} = V_{Rsd}(\cotg\theta = 2.5)$ , ricavando il valore del passo  $s$  tramite l'Eq.(31);
- 3)  $V_{Rcd2} \leq V_{Ed} \leq V_{Rcd1} \rightarrow$  impongo le condizioni ottimali di rottura dei due meccanismi resistenti "taglio compressione" e "taglio trazione", uguagliando i valori di  $V_{Rcd}$  e  $V_{Rsd}$  a quello del taglio agente  $V_{Ed}$ . Sostituendo l'Eq.(29) rispettivamente nelle Eq.(30) e Eq.(31), si determinano le due seguenti relazioni:

$$qL = \frac{0,9b_w d \alpha_c \sigma_{cd} (\cotg\alpha + \cotg\theta)}{(1 + \cotg^2\theta)} \quad (32)$$

$$qL = 1,8d f_{yd} \frac{A_{sw}}{s} (\cotg\alpha + \cotg\theta) \sin\alpha \quad (33)$$

Ricavando l'incognita  $\cotg\theta$  dalla Eq.(32) e sostituendo tale valore nell'Eq.(33), è possibile determinare il passo  $s$  della staffatura.

In tutti i casi, il passo  $s$  dell'armatura trasversale non deve risultare superiore alla minore tra le grandezze imposte dalle NTC08 (§7.4.6.2.1), di seguito riportate:

- un quarto dell'altezza utile della sezione trasversale;
- 175 mm e 225 mm, rispettivamente per CD "A" e CD "B";
- 6 volte e 8 volte il diametro minimo delle barre longitudinali considerate ai fini delle verifiche, rispettivamente per CD "A" e CD "B"; \*
- 24 volte il diametro delle armature trasversali.

\* In tale studio, è stata trascurata tale limitazione poiché ci si trova in una fase sperimentale del calcolo nella quale non è prevista una determinazione del diametro commerciale da utilizzare per le barre longitudinali, bensì il solo calcolo dell'area  $A_s$ .

#### 4.3.2 DEFINIZIONE DI $A_{swmin}$ E DISTINTA DEI FERRI TRASVERSALI

Il passo  $s$  dell'armatura trasversale è stato finora dimensionato per garantire la resistenza della sezione al massimo sforzo di taglio agente sulla trave (Eq.(29)), risultando quindi necessario solo nelle sezioni maggiormente sollecitate (in prossimità degli appoggi).

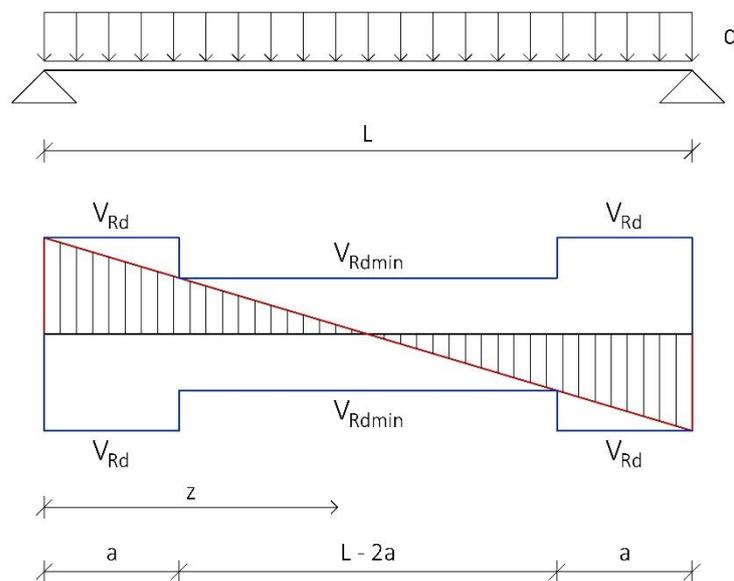


Figura 23 – Diagramma sforzi di taglio dello schema di trave considerato

In accordo con l'EC2 (§9.2.2), è stata definita  $\rho_w$  la percentuale geometrica di armatura trasversale

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s b_w \sin \alpha} \quad (34),$$

la quale non può risultare minore di  $\rho_{wmin}$ , posta pari a

$$\rho_{wmin} = \frac{0.08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (35).$$

Imponendo l'uguaglianza tra l'Eq.(34) e l'Eq.(35), è possibile determinare il passo  $s_{max}$  della staffatura nelle zone a ridosso della mezzeria (meno sollecitate a sforzo di taglio), il quale deve comunque far riferimento ai limiti imposti dalle NTC08 (§7.4.6.2.1).

Sostituendo il valore di  $s_{max}$  nell'Eq.(31), si determina il valore di sforzo di taglio resistente minimo (lato "taglio trazione")  $V_{Rsdmin}$  imposto da normativa, risultando pari a:

$$V_{Rsdmin} = 0,9df_{yd} \frac{A_{sw}}{s_{max}} (\cot\alpha + \cot\theta) \sin\alpha \quad (36).$$

Infine si calcola la distanza in prossimità degli appoggi nella quale è necessario disporre la staffatura con un passo pari a  $s$  (come da paragrafo 4.3.1), prevedendo invece nel restante tratto di mezzeria una staffatura con un passo massimo pari a  $s_{max}$ . Conoscendo la legge di variazione del diagramma di sforzo di taglio agente al variare dell'ascissa  $z$ , è possibile determinare, in accordo con la simbologia utilizzata in Figura 23, il valore di  $a$ :

$$a = \frac{L}{2} - \frac{V_{Rsdmin}}{q} \quad (37)$$

In definitiva, nei due tratti di trave prossimi agli appoggi ( $z = a$  e  $z = L - a$ ), è necessario disporre l'armatura trasversale  $A_{sw}$  con un passo pari a  $s$  tale da resistere al massimo sforzo di taglio agente  $V_{Ed}$ , mentre nel restante tratto di campata è sufficiente disporre una quantità di armatura trasversale con un passo pari a  $s_{max}$ .

In conclusione, si determina il numero di staffe all'interno dell'intera trave, dividendo la lunghezza del tratto considerato per il passo della staffatura relativo, ottenendo

$$n_s = \frac{a}{s} \quad \text{nei tratti prossimi agli appoggi} \quad (38a)$$

$$n_{smax} = \frac{L-2a}{s_{max}} \quad \text{nel tratto di trave restante} \quad (38b).$$

### 4.3.3 DETERMINAZIONE DELL'IMPATTO GLOBALE DELLA TRAVE

I volumi di armatura longitudinale e trasversale risultano, quindi, rispettivamente pari a:

$$Vol_{long} = 3 A_{smin} z_1 + \frac{5}{4} A_s g \quad (39a)$$

$$Vol_{staf} = P_{staf} A_{sw} \left( ns + \frac{n_{smax}}{2} \right) \quad (39b)$$

dove:

$$- P_{staf} = 2 (H + b - 4c) + 20\phi_{staf} \quad (40)$$

è la lunghezza del perimetro delle staffe;

$$- \phi_{staf} \text{ è il diametro della barra di armatura trasversale.}$$

Il volume di calcestruzzo lordo (complessivo dei volumi di acciaio) risulta pari a

$$Vol_{cls} = H b L \quad (41).$$

Infine, l'impatto globale della trave (progettata agli SLU sia per flessione che per sforzi di taglio)

**BI**, in termini di CO<sub>2</sub> rilasciata in atmosfera risulta pari a:

$$BI = \beta [Vol_{cls} - (Vol_{long} + Vol_{staf})] + \varphi_s (Vol_{long} + Vol_{staf}) \quad (42).$$

## **CAPITOLO 5. APPLICAZIONE DEL MODELLO**

## 5.1 CONFRONTO CON IL MODELLO "A"

Analogamente a quanto descritto nel paragrafo 4.2.4, tramite la procedura di calcolo mostrata in Figura 24, sono state costruite le funzioni di  $S$ ,  $f_{co}$  e  $BI$  di una trave in calcestruzzo semplicemente appoggiata, progettata sia a flessione che a sforzi di taglio, avente gli stessi dati di input, ovvero:

- $\delta = 48,088 \text{ kgCO}_2 / (\text{m}^3 \text{ MPa}^{0.5})$
- $\alpha/100 = -0,006732$
- $\gamma/100 = -0,009731$
- $L = 5000 \text{ mm}$
- $De = 25,00 \text{ kN/m}^3$
- $q_d = 46,50 \text{ kN/m}$
- $k_2 = 3,50$
- $\varphi = 1174,525 \text{ KgCO}_2 / \text{m}^3$

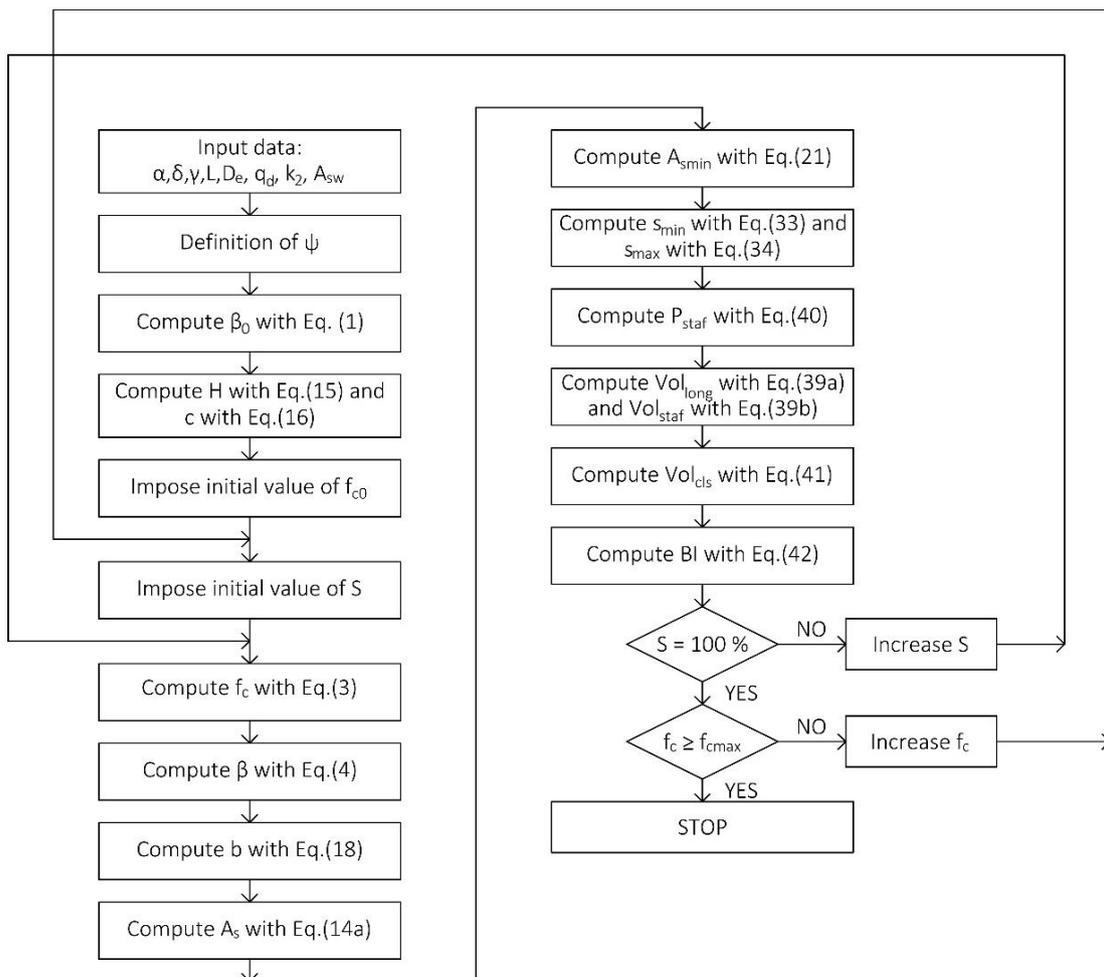


Figura 24 - Algoritmo di calcolo per la definizione del diagramma  $S$ - $f_{co}$ - $BI$  del modello "B"

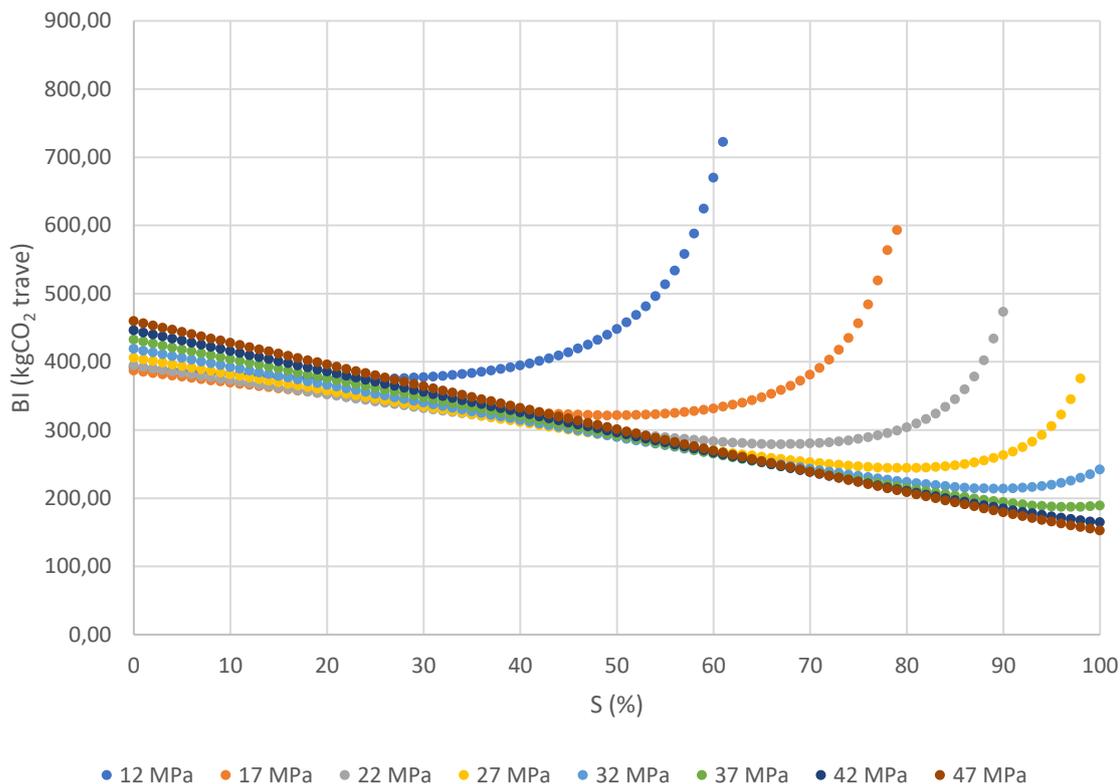


Figura 25 - Diagramma S-f<sub>co</sub>-BI, modello "B"

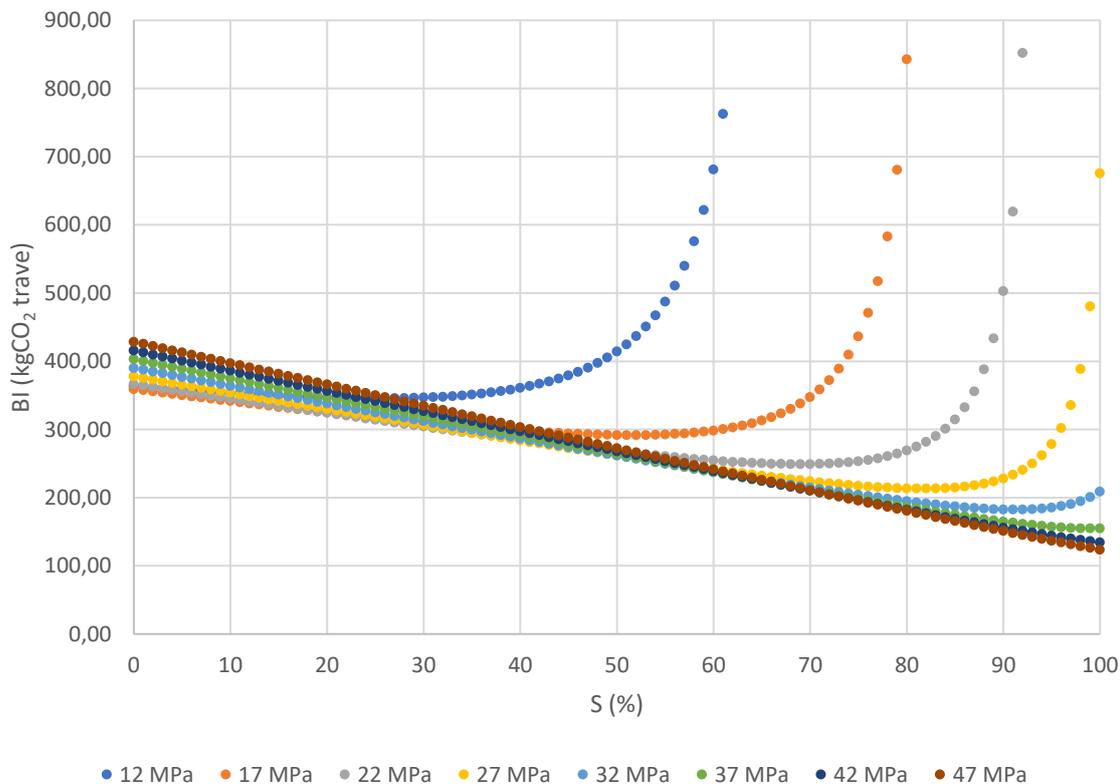


Figura 26 - Diagramma S-f<sub>co</sub>-BI, modello "A"

### 5.1.1 RISULTATI OTTENUTI

I risultati dello studio precedentemente descritto, confrontato con il modello "A" (sola sollecitazione di flessione), portano alle seguenti conclusioni.

Analogamente al modello "A":

- Per una data resistenza iniziale  $f_{co}$ , l'impatto della trave in calcestruzzo ha un valore minimo ( $BI_{min}$ ) in corrispondenza della percentuale di sostituzione  $S_F$  (quest'ultima compresa tra 0 % e 100 % e varia a seconda della resistenza  $f_{co}$ ). Quando  $S < S_F$ , l'impatto risulta maggiore di  $BI_{min}$  a causa dell'alto contenuto di clinker, nonostante le dimensioni della trave risultino minori. Quando  $S > S_F$ , l'impatto è maggiore a causa del maggior quantitativo di calcestruzzo (e acciaio) a causa dell'alto tasso di sostituzione di ceneri volanti e conseguente riduzione di resistenza meccanica del calcestruzzo.
- L'impatto iniziale  $BI_o$  risulta maggiore all'incrementare della resistenza meccanica iniziale  $f_{co}$ . Tuttavia, il minimo relativo  $BI_{min}$  si sposta verso tassi di sostituzione  $S$  più elevati e diminuisce con l'aumentare di  $f_{co}$ .

L'aggiunta dell'armatura compressa  $A'_s$  e l'introduzione dell'armatura trasversale  $A_{sw}$ , comporta un incremento globale di  $BI$ , dovuto alla maggiore presenza di acciaio all'interno della trave, di circa il 10 % rispetto al modello "A".

La percentuale massima di sostituzione  $S$ , invece, non è altrettanto sensibile alla presenza di maggiore armatura all'interno della trave.

Restano praticamente invariate le conclusioni del precedente modello, poiché l'andamento globale del modello non varia, al netto dell'incremento dell'impatto  $BI$  di circa il 10 %. Quindi, risulta più conveniente utilizzare calcestruzzi con valore di resistenza meccanica  $f_{co}$  elevata e massimizzare in essi il tasso di sostituzione del clinker  $S$  con le ceneri volanti.

## 5.2 L'ANALISI DELLE VARIABILI ALL'INTERNO DEL MODELLO

Il modello sperimentale di calcolo presenta all'interno dei dati di input alcune variabili, quali la percentuale di sostituzione  $S$ , la luce della trave  $L$ , il coefficiente  $\alpha$  ( $\alpha = H/L$ ), lo spessore del copriferro  $c$  e la resistenza meccanica  $f_{co}$ . Pertanto, è possibile definire la funzione dell'impatto globale  $BI$  come:

$$BI = f(S, L, \alpha, c, f_{co}).$$

Al fine di comprendere a quali di queste variabili il modello risulti maggiormente sensibile, sono state analizzate diverse combinazioni intervenendo sul valore delle suddette.

### 5.2.1 DEFINIZIONE DELLE VARIABILI

#### Variabile 1: Luce della trave $L$

In generale, le travi in cemento armato hanno una luce che raramente risulta essere inferiore ai 3 metri o superiore agli 8 metri di lunghezza. Di conseguenza, la variabile  $L$  è stata analizzata nell'intervallo

$$3 \text{ m} \leq L \leq 8 \text{ m}$$

#### Variabile 2: Il coefficiente $\alpha$

Come già riportato nel paragrafo 4.2.1, secondo l'EC2 non è necessaria la verifica di deformabilità flessionale nelle strutture inflesse in calcestruzzo armato se il rapporto  $H/L$  risulta essere limitato entro un intervallo tale da evitare i fenomeni di inflessione.

In accordo con EC2, alla tabella 7.4N viene suggerito un intervallo per il valore del rapporto  $H/L$  per travi semplicemente appoggiate, ovvero:

$$\frac{1}{20} \leq \alpha \leq \frac{1}{14}.$$

In questo studio, la variabile  $\alpha$  è stata analizzata imponendone l'uguaglianza con i due estremi del suddetto intervallo.

#### Variabile 3: Il copriferro $c$

Lo spessore del copriferro nelle strutture in c.a. è prettamente un problema di durabilità (paragrafo 4.2.2). In riferimento all'EC2, viene riportata la tabella 4.4N la quale definisce, al variare della classe di esposizione e della classe strutturale, il minimo spessore di copriferro richiesto.

Tabella 9 - Tabella 4.4 N, EC2 - Copriferro minimo richiesto

Classe strutturale	Classi di esposizione ambientale in accordo con il prospetto 4.1 (EC2)						
	X <sub>0</sub>	XC <sub>1</sub>	XC <sub>2</sub> /XC <sub>3</sub>	XC <sub>4</sub>	XD <sub>1</sub> /XS <sub>1</sub>	XD <sub>2</sub> /XS <sub>2</sub>	XD <sub>3</sub> /XS <sub>3</sub>
S <sub>1</sub>	10	10	10	15	20	25	30
S <sub>2</sub>	10	10	15	20	25	30	35
S <sub>3</sub>	10	10	20	25	30	35	40
S <sub>4</sub>	10	15	25	30	35	40	45
S <sub>5</sub>	15	20	30	35	40	45	50
S <sub>6</sub>	20	25	35	40	45	50	55

Facendo riferimento alla classe strutturale S<sub>4</sub> (costruzioni ordinarie), è stata analizzata la variabile  $c$  corrispondente a tre diverse classi di esposizione ambientale: XC<sub>2</sub>, XD<sub>1</sub> e XD<sub>3</sub>.

$$XC2) c = 25 \text{ mm} \quad XD1) c = 35 \text{ mm} \quad XD3) c = 45 \text{ mm}$$

#### **Variabile 4: La resistenza meccanica $f_{co}$**

In accordo all'EC2, sono state analizzate le resistenze meccaniche associate a calcestruzzi aventi classe di resistenza inferiore a C<sub>50/60</sub> (ipotesi sui diagrammi costitutivi, paragrafo 4.2).

#### **5.2.2 DEFINIZIONE DEI DIAGRAMMI S-BI**

Analogamente a quanto descritto nel paragrafo 5.1, tramite la procedura di calcolo mostrata in Figura 24 sono state costruite le funzioni di  $S$ ,  $f_{co}$  e  $BI$  di una trave in calcestruzzo semplicemente appoggiata, progettata sia a flessione che a sforzo di taglio, al variare dei valori delle variabili sopracitate.

Le variabili di input analizzate sono:

- Luce della trave:  $L = 3,4,5,6,7,8 \text{ m}$
- Rapporto  $H/L$ :  $\alpha_{min} = \frac{1}{20}, \alpha_{max} = \frac{1}{14}$
- Spessore del copriferro:  $c = 25,35,45 \text{ mm}$
- Resistenza meccanica del calcestruzzo:  $f_{co} = 20,25,30,35,40,45,50,55 \text{ MPa}$

Di seguito sono stati riportati, a titolo di esempio, alcuni diagrammi  $S-BI$  di una trave semplicemente appoggiata avente luce  $L$  pari a 3 m e 8 m di lunghezza, ottenuti, per una data resistenza meccanica iniziale del calcestruzzo  $f_{co}$ , facendo variare il valore del coefficiente  $\alpha$  e dello spessore del copriferro  $c$ .

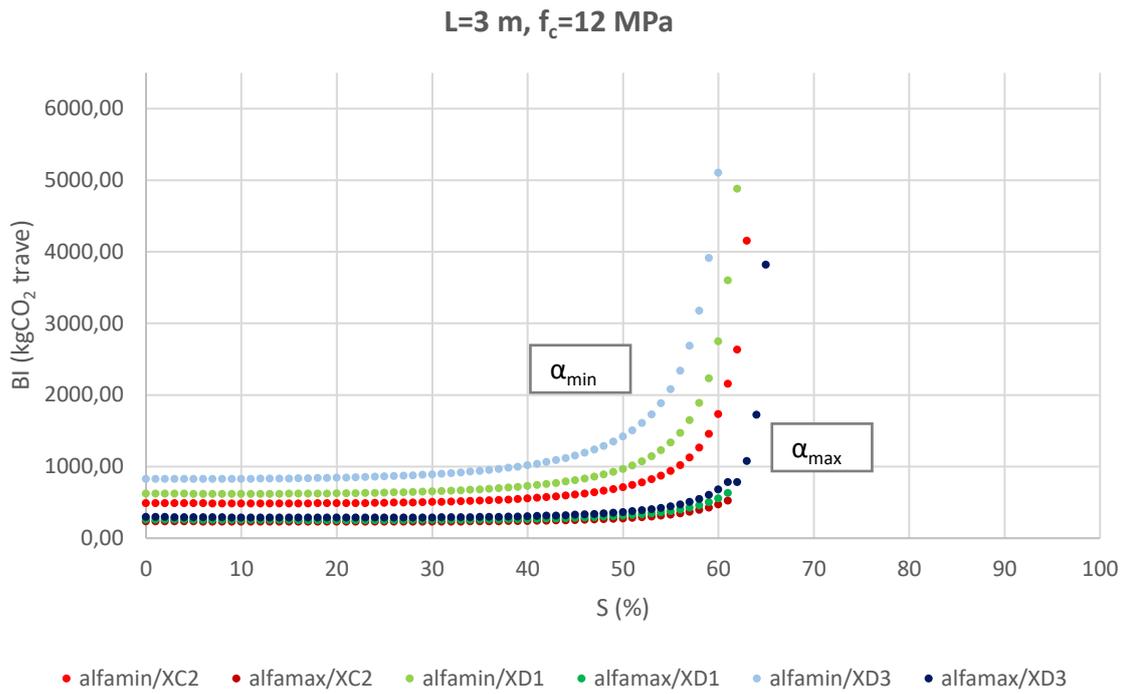


Figura 27 - Diagramma S-Bl,  $f_c = 12$  MPa,  $L = 3$  m

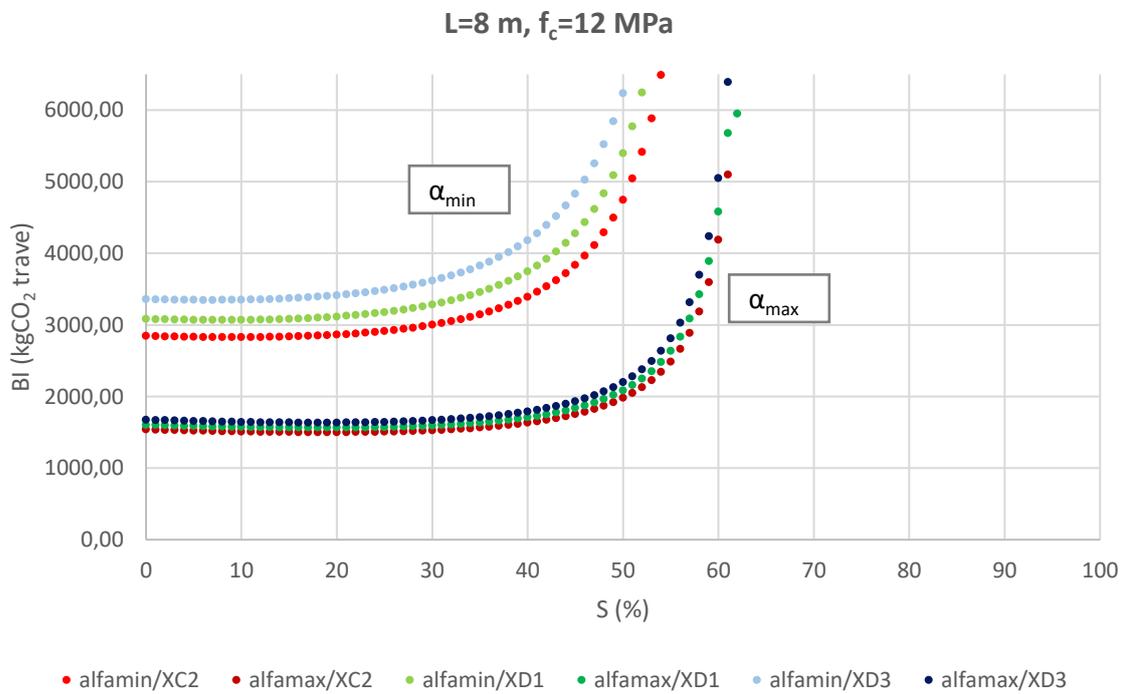


Figura 28 - Diagramma S-Bl,  $f_c = 12$  MPa,  $L = 8$  m

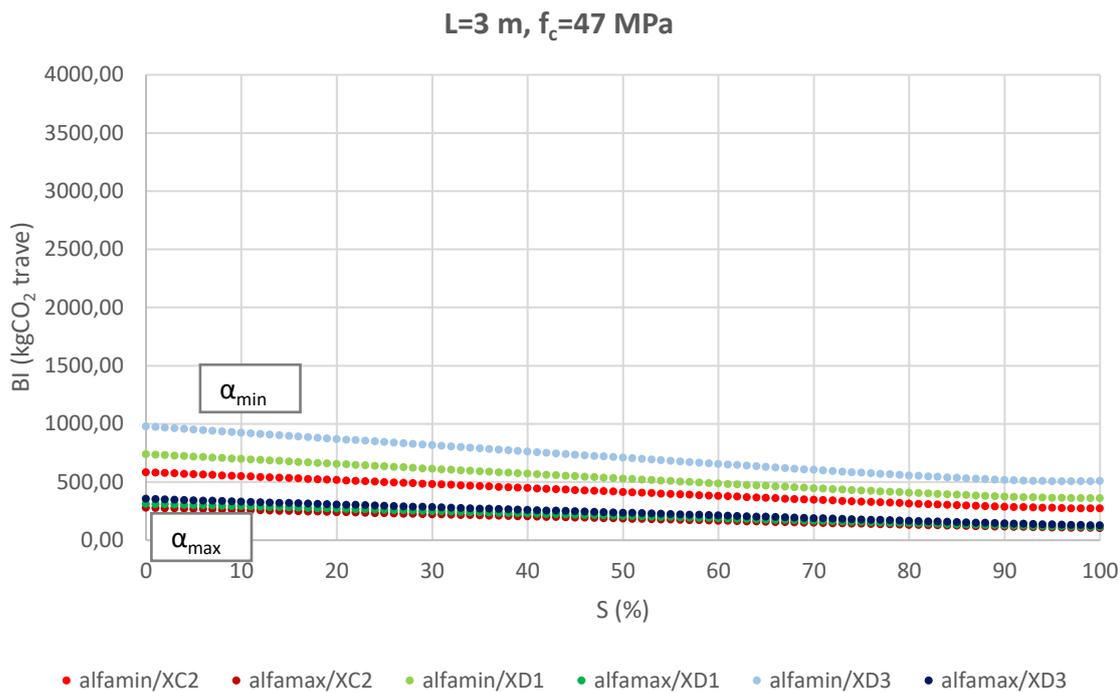


Figura 29 - Diagramma S-BI,  $f_c = 47$  MPa,  $L = 3$  m

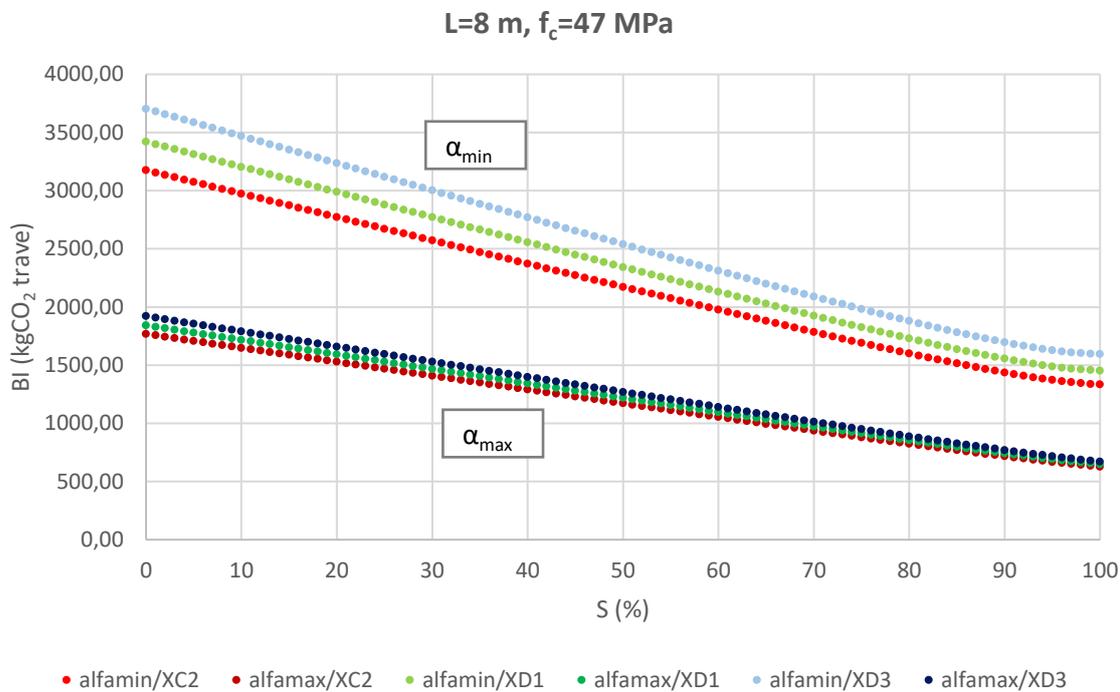


Figura 30 - Diagramma S-BI,  $f_c = 47$  MPa,  $L = 8$  m

### 5.2.3 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI

Alla luce dei risultati ottenuti, è possibile evincere che:

- Rimangono inalterate le considerazioni fatte sull'andamento della funzione  $BI$  al variare delle resistenze meccaniche  $f_c$  (paragrafo 5.1.1);
- La luce della trave ( $L$ ) è la variabile alla quale il sistema risulta essere maggiormente sensibile. Infatti, a parità di valori di resistenza meccanica  $f_{co}$  e spessore del copriferro  $c$ , si registra un incremento considerevole (circa un 80% in più per ogni metro di lunghezza) dell'impatto globale  $BI$  della trave. Ovviamente, un incremento della luce si ripercuote sull'altezza della sezione resistente, portando ad un aumento del volume di calcestruzzo necessario;
- A prescindere dalla lunghezza della luce della trave, il delta in termini di  $BI$  misurato passando da una classe di esposizione ambientale (e conseguente cambio di spessore di copriferro) ad un'altra, risulta essere maggiore utilizzando un rapporto  $H/L$  più basso. Infatti, è possibile notare in tutti i diagrammi ottenuti, come le curve  $alfamin/XC2$ ,  $alfamin/XD1$  e  $alfamin/XD3$  siano molto più distanti tra loro rispetto a quelle caratterizzate da un rapporto  $H/L$  posto pari a  $\alpha_{max}$ .

Quindi, in definitiva, è possibile sostenere che indipendentemente dai valori di  $L$  e  $f_c$ , progettare una trave utilizzando un rapporto  $H/L$  prossimo a  $\alpha_{max}$ , produce un impatto globale  $BI$  praticamente invariato a prescindere dalla classe di esposizione ambientale. Non vale lo stesso per le travi caratterizzate da  $\alpha_{min}$ , in quanto questo non accade: bisogna comunque far riferimento a tre andamenti distinti e separati.

Nell'**ALLEGATO I** vengono riportati tutti i grafici ottenuti secondo le modalità descritte nel paragrafo 5.2.2.

### 5.3 RICERCA DELLA FUNZIONE GENERALE

Infine, sono state utilizzate le numerose combinazioni di variabili analizzate nella fase precedente dello studio come database di partenza della successiva fase di ricerca di una nuova funzione, capace di descrivere l'andamento delle emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte al variare della sola variabile  $S$ , definibile come:

$$bi = f(S).$$

Per definire tale funzione, è stato necessario adimensionalizzare il valore dell'impatto globale  $BI$ , calcolato al variare di  $S$ , rispetto al suo valore calcolato in assenza di strategia di sostituzione ( $S=0$ ), ovvero:

$$bi_S = \frac{BI_S}{BI_0}$$

dove:

- $bi_S$  è il valore adimensionalizzato dell'impatto globale, al variare della percentuale di sostituzione  $S$  ( $0 \leq S \leq 100$ );
- $BI_S$  è il valore dell'impatto globale in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte (kg), al variare della percentuale di sostituzione  $S$  ( $0 \leq S \leq 100$ );
- $BI_0$  è il valore dell'impatto globale in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte (kg), calcolato con  $S = 0$ .

### 5.3.1 ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI

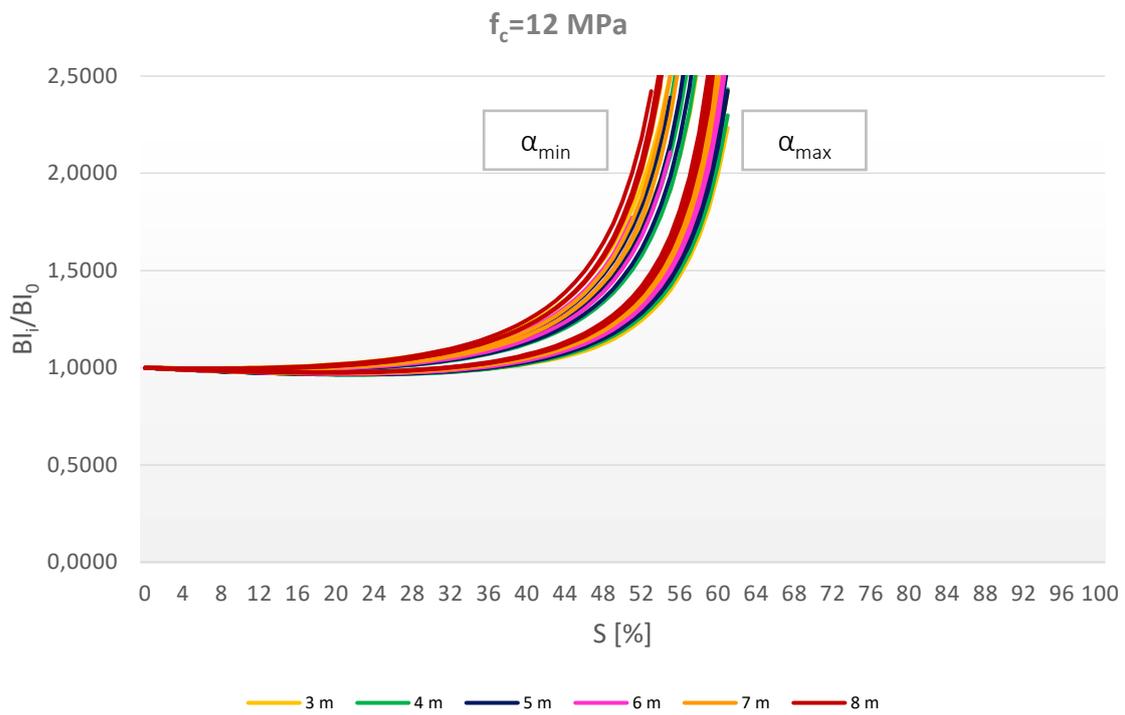


Figura 31 – Diagramma bi-S,  $f_c = 12 \text{ MPa}$

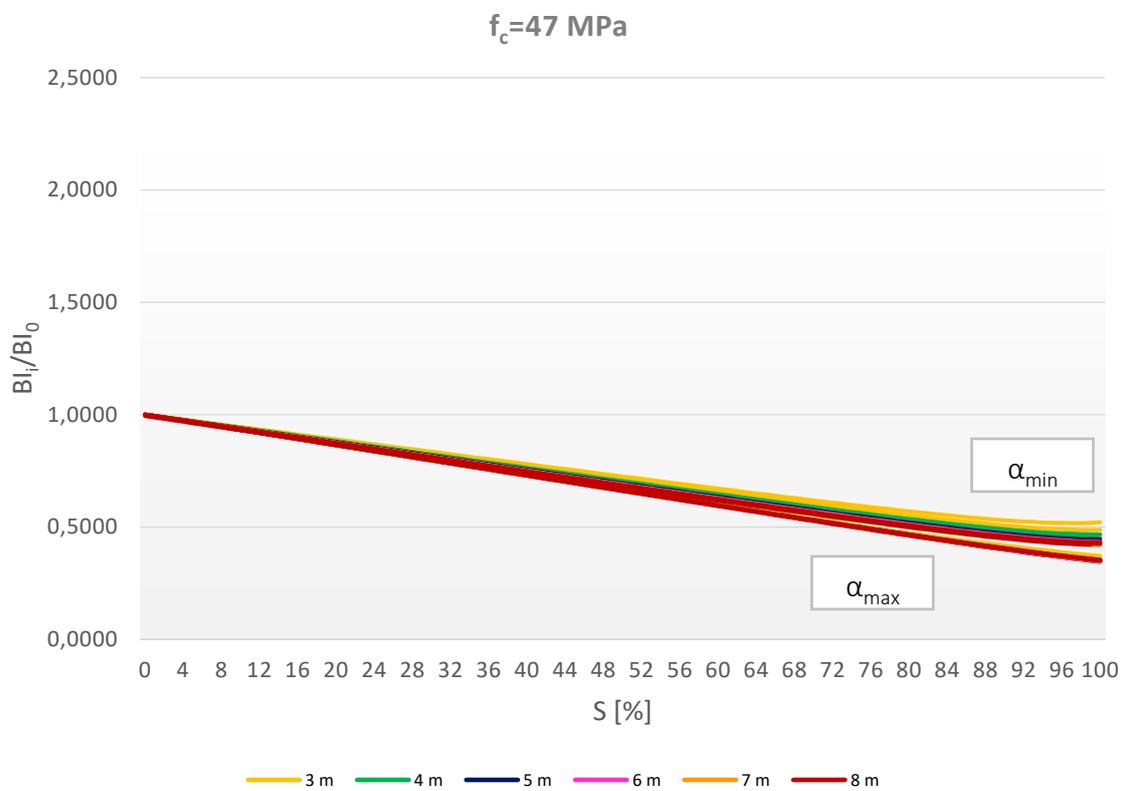


Figura 32 – Diagramma bi-S,  $f_c = 47 \text{ MPa}$

Sono stati riportati, a titolo di esempio, due diagrammi *bi-S* riferiti rispettivamente a una resistenza meccanica  $f_{co}$  pari a 20 e 55 MPa.

Alla luce dei risultati ottenuti, è possibile evincere che:

- Rimangono invariate le considerazioni avanzate nelle precedenti analisi;
- Non è possibile definire un'unica funzione generale  $bi = f(S, f_{co})$ , in quanto l'andamento è fortemente legato alla resistenza meccanica del calcestruzzo utilizzata. Infatti, per classi di resistenza basse (es:  $f_c = 12$  MPa), la funzione *bi* è caratterizzata da un tratto iniziale avente pendenza quasi orizzontale e la presenza di un asintoto verticale. Incrementando il valore della resistenza meccanica  $f_{co}$  (es:  $f_c = 47$  MPa), il tratto iniziale assume una pendenza via via più accentuata verso il basso, mentre l'asintoto verticale tende ad infinito. Pertanto, la funzione *BI* è definibile come

$$BI = f(S, f_{co}).$$

Nell'**ALLEGATO II** vengono riportati tutti i grafici ottenuti secondo le modalità descritte nel paragrafo 5.3.

In definitiva, per determinare la quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> emesse in fase di produzione di una trave semplicemente appoggiata, non è possibile utilizzare un'unica funzione generica che sia indipendente dalle numerose variabili in gioco. È altresì necessario usufruire dei diagrammi forniti in allegato a questo lavoro di tesi (**ALLEGATO I**), o, in presenza di dati di input intermedi tra quelli proposti in questo studio, procedere ad un'interpolazione lineare.

## 5.4 LO STATO LIMITE DI SOSTENIBILITÀ

In merito a quanto illustrato nel paragrafo 2.2.2 e alla luce dei risultati ottenuti, è possibile definire un nuovo Stato Limite: lo **Stato Limite di Sostenibilità**.

Facendo riferimento alla Direttiva Europea del febbraio 2011, con la quale gli Stati membri dell'Unione Europea hanno confermato l'impegno di **ridurre le emissioni di gas serra del 20 %** entro il 2020, è ipotizzabile un approccio di tipo prestazionale, da parte di un organo normatore, introducendo un nuovo Stato Limite in grado da garantire tale obiettivo.

È possibile introdurre un'ulteriore condizione all'interno del modello sviluppato nel presente lavoro di tesi, che tenga conto dei limiti proposti dal Consiglio Europeo. Basterebbe, infatti, definire una funzione limite  $bi_{SLS}$  di tipo costante, pari al valore percentuale di emissioni calcolato in assenza di strategia di sostituzione ( $bi_0 = 1$ ) ridotto della percentuale richiesta (20 % di riduzione), nei diagrammi  $bi$ - $S$  precedentemente prodotti, ovvero:

$$bi_{SLS} = 0.80.$$

Vengono riportati, a titolo di esempio, i tre diagrammi seguenti:

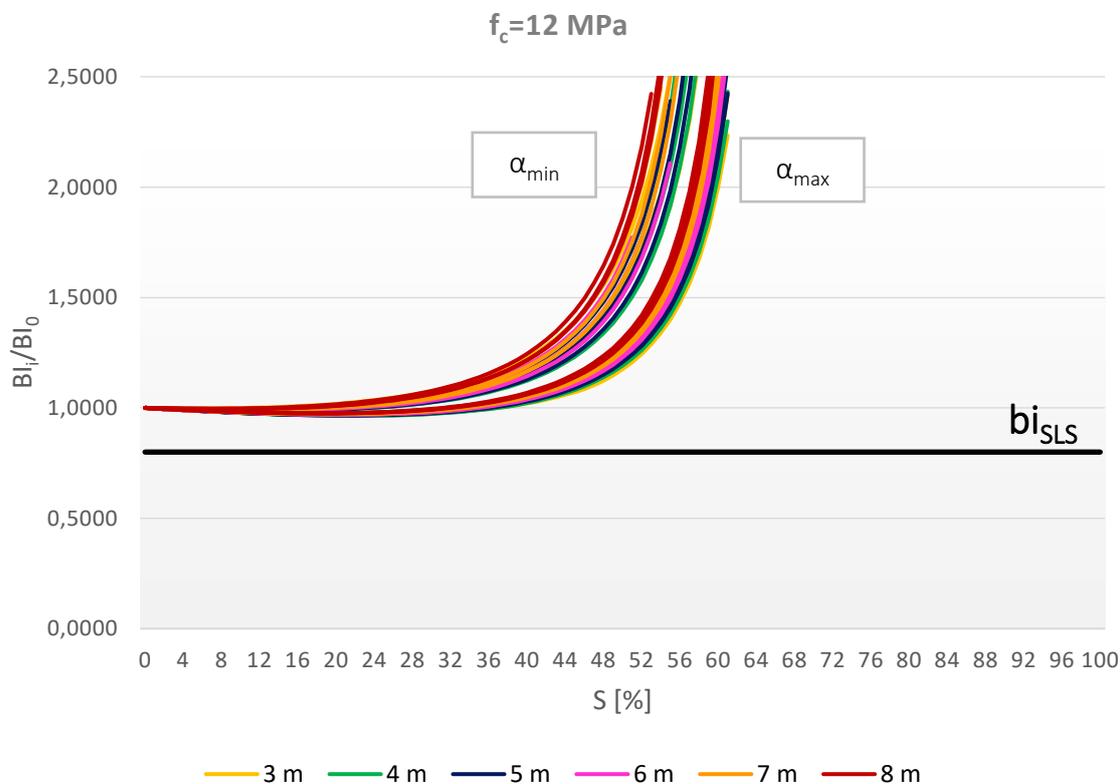


Figura 33 - Diagramma  $bi$ - $S$ ,  $f_c = 12 \text{ MPa}$  con l'introduzione di  $bi_{SLS}$

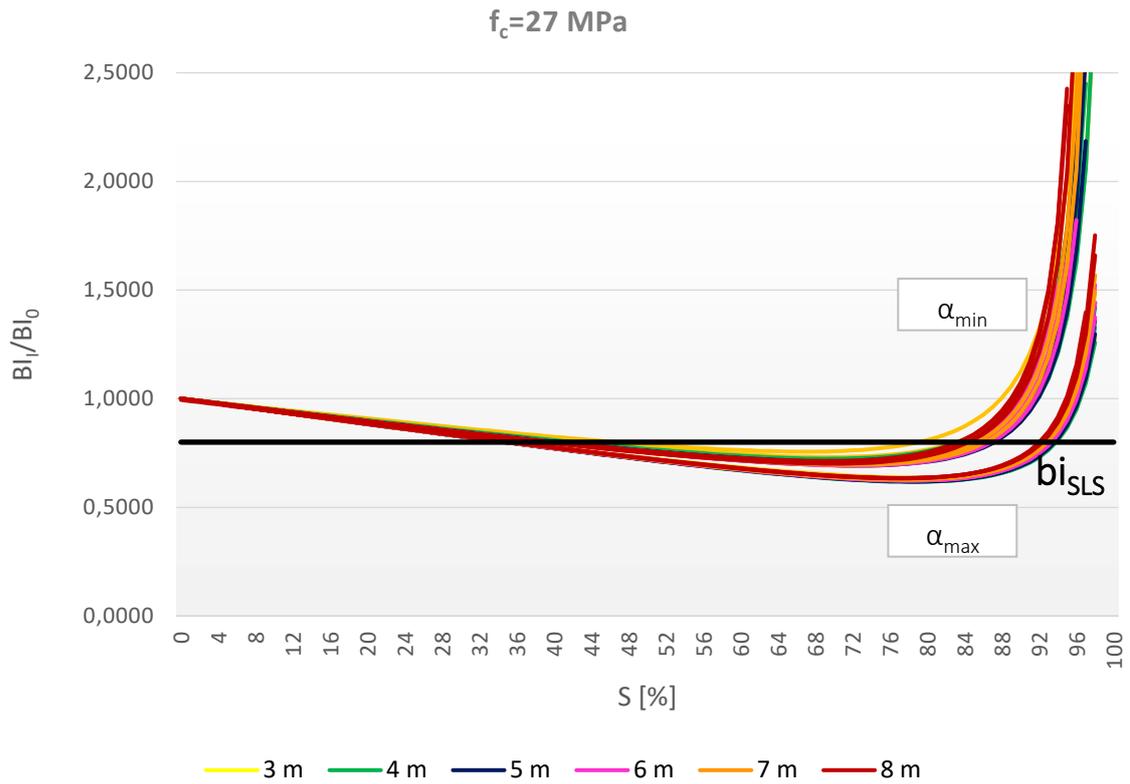


Figura 34 - Diagramma bi-S,  $f_c = 27 \text{ MPa}$  con l'introduzione di  $bi_{SLs}$

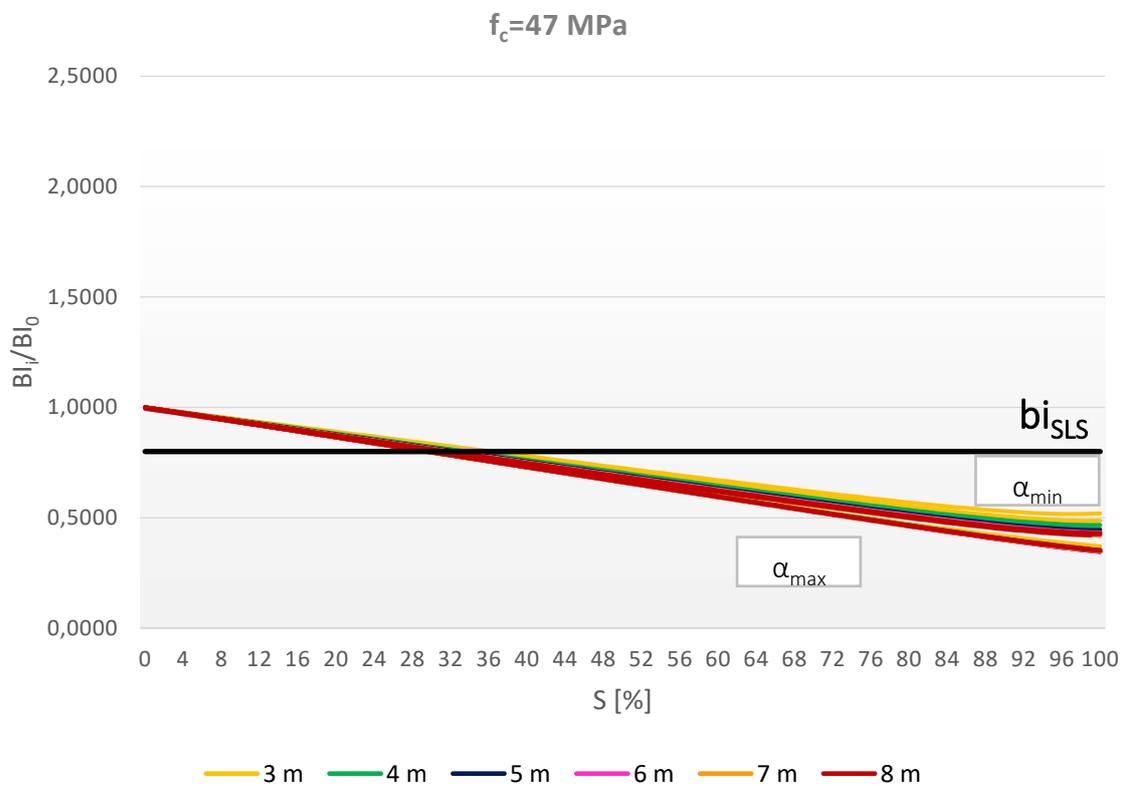


Figura 35 - Diagramma bi-S,  $f_c = 47 \text{ MPa}$  con l'introduzione di  $bi_{SLs}$

### 5.4.1 CONSIDERAZIONI FINALI

L'introduzione di un nuovo Stato Limite (**SLS**) mediante una nuova funzione  $bi_{SLS}$  all'interno dei grafici prodotti tramite il modello sperimentale, porta ad una serie di considerazioni finali:

- **È un metodo di rappresentazione e verifica immediata:** tutte le combinazioni aventi valori  $bi_S$  inferiori al valore della funzione  $bi_{SLS}$  verificano la condizione di Stato Limite di Sostenibilità; i valori  $bi_S$  che risultano essere maggiori di  $bi_{SLS}$  non sono considerabili come condizioni verificate.
- **Non tutte le classi di resistenza del calcestruzzo (< C50/60) soddisfano la nuova condizione limite  $bi_{SLS} = 0.80$ :** le emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte utilizzando calcestruzzi con classi di resistenza aventi  $f_{co}$  pari a 20 e 25 MPa risultano superiori, a qualsiasi percentuale di sostituzione  $S$ , al limite massimo imposto. Pertanto non sarebbe verificata la condizione di Stato Limite di Sostenibilità per le travi progettate utilizzando calcestruzzi aventi basse classi di resistenza.
- **Viene garantito l'approccio di tipo prestazionale in accordo con le normative tecniche vigenti:** è un metodo che lascia la libertà al progettista di poter scegliere quale combinazione di variabili ( $S, L, \alpha, c, f_{co}$ ) adottare nel proprio progetto, senza imporre una combinazione di variabili univoca.
- **Possibile esistenza di un valore limite  $S_{max}$ :** a seconda della resistenza meccanica iniziale  $f_{co}$  scelta, l'intervallo di valori di percentuale di sostituzione  $S$  che garantiscono la condizione di Stato Limite di Sostenibilità varia. In alcuni casi (es. Figura 34), non vi è una sola intersezione tra le funzioni  $bi$  e  $bi_{SLS}$  (valore limite  $S_{min}$ ), bensì due (valore limite minimo e massimo, rispettivamente  $S_{min}$  e  $S_{max}$ ). In tale caso, utilizzare un mix design avente una percentuale di sostituzione  $S$  troppo alta, non garantirebbe una verifica a SLS positiva.

Nell'**ALLEGATO III** vengono riportati tutti i grafici ottenuti secondo le modalità descritte nel paragrafo 5.4.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è cercato, sulla base delle indicazioni e dei risultati ottenuti da Habert e Roussel nello studio sulle strategie composizione dei mix-design di calcestruzzo (G. Habert, 2009), di sviluppare una sorta di nuovo *modus operandi* nella progettazione agli Stati Limite delle strutture in cemento armato. Questo criterio di progettazione è in grado di valutare la risposta di una struttura in c.a. nei confronti delle proposte di riduzione delle emissioni emanate dal Consiglio Europeo.

È stato sviluppato un modello di calcolo, facendo riferimento alle indicazioni normative dell'EC<sub>2</sub>, tale da tenere in considerazione l'impatto ambientale **BI** in termini di emissioni di anidride carbonica, prodotte durante l'intero processo di produzione, della quantità di cemento necessaria alla progettazione agli SLU di una trave in c.a., in configurazione di semplice appoggio.

In prima analisi, all'interno del modello è stata valutata la sola sollecitazione di flessione semplice, ipotizzando di avere, lungo tutto l'asse della trave, un'armatura longitudinale tale da eguagliare il momento massimo agente. Dai risultati ottenuti, si evince che risulta più conveniente utilizzare calcestruzzi con valore di resistenza meccanica elevata e massimizzare in essi la percentuale di sostituzione del clinker con le ceneri volanti.

Successivamente, il modello è stato migliorato introducendo il calcolo agli SLU per azioni taglianti, progettando dettagliatamente la distinta delle armature longitudinali (tesa e compressa) e trasversali lungo l'asse della trave, in funzione della sollecitazione agente. Ne risulta che l'aggiunta di armatura compressa superiore e l'introduzione dell'armatura trasversale, comporta un incremento globale di **BI**, dovuto alla maggiore presenza di acciaio all'interno della trave, di circa il 10 % rispetto al modello precedente.

Nella seconda parte dello studio, si è cercato di definire un'unica funzione generale tale da descrivere l'andamento di **BI** al variare della sola percentuale di sostituzione, adimensionalizzando i valori  $BI_S$  rispetto al valore iniziale  $BI_0$ . Alla luce dei risultati ottenuti, non è stato possibile definire una sola funzione generale poiché il sistema risulta fortemente legato alla resistenza meccanica considerata. Pertanto, al fine di determinare la quantità di emissioni di CO<sub>2</sub> prodotte, è necessario usufruire dei diagrammi forniti in allegato o calcolare il quantitativo di anidride carbonica di volta in volta, al variare dei dati di input.

In ultima analisi, è stata proposta l'adozione di un nuovo Stato Limite, in riferimento alle disposizioni della Direttiva Europea del febbraio 2011, introducendo una funzione di Stato Limite di Sostenibilità che tiene conto della riduzione del 20 % di emissioni di gas serra entro il 2020.

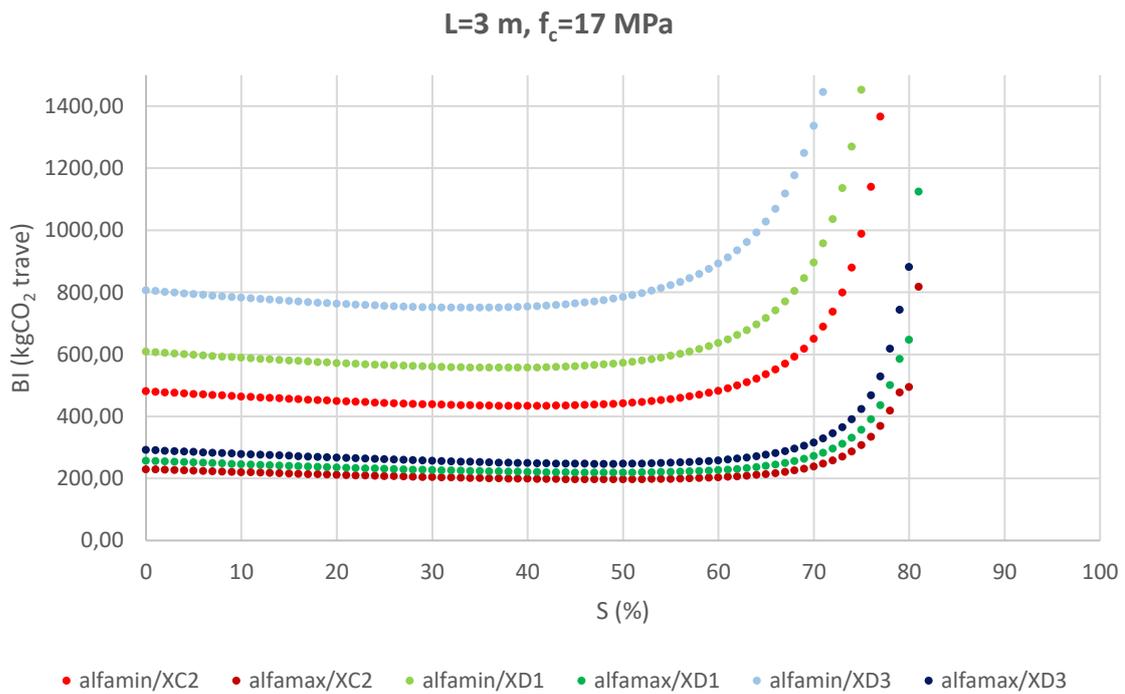
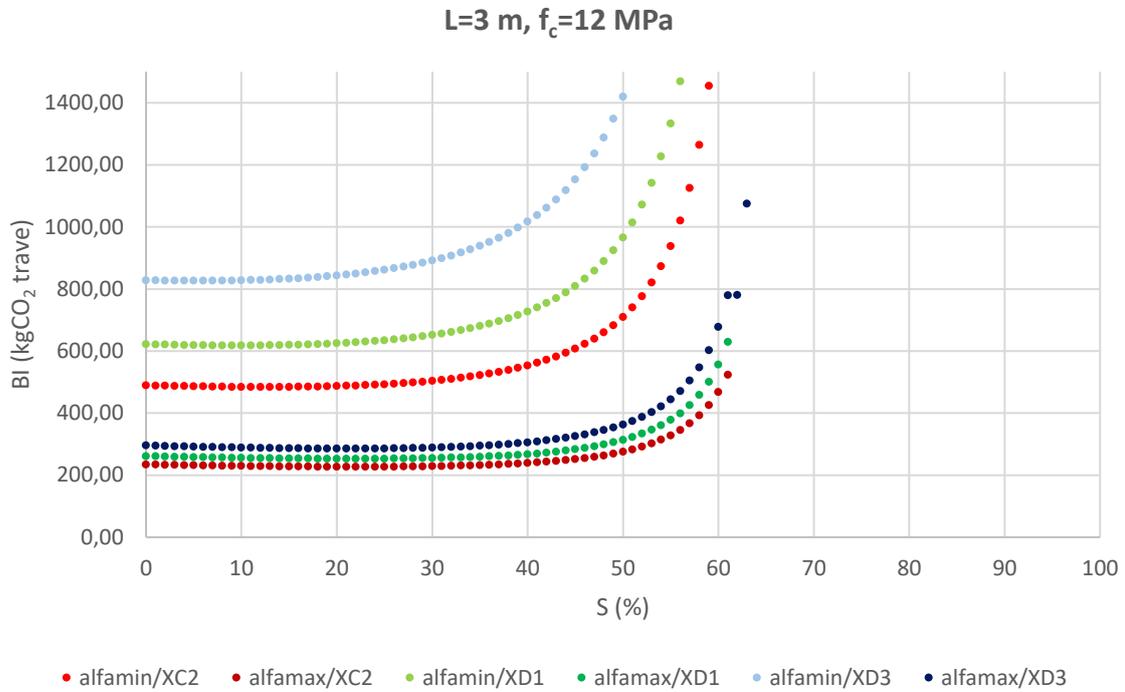
Tale introduzione risulta essere un metodo di verifica immediata e intuitiva, continuando a garantire un approccio di tipo prestazionale da parte del progettista, il quale rimane indipendente nella scelta della percentuale di sostituzione e delle altre variabili da utilizzare. È interessante notare come non tutte le classi di resistenza dei calcestruzzi analizzati verificano la condizione del nuovo Stato Limite, risultando, in tal caso, **non più idonee** all'utilizzo nel campo del calcolo strutturale.

Infine, è doveroso ricordare che la sostituzione di cemento con ceneri volanti potrebbe ridurre il pH dell'ambiente basico del calcestruzzo, provocando una conseguente corrosione delle barre d'acciaio impiegate al suo interno e riducendone, in tal caso, la durabilità. Per questa ragione, è necessario approfondire con studi futuri suddetto comportamento, in maniera tale da imporre dei limiti alla percentuale di sostituzione del cemento per non incorrere in problematiche di durabilità. Inoltre, allargare i concetti espressi in questo lavoro di tesi a strutture più complesse, porterebbe ad un'analisi più completa nei confronti delle configurazioni strutturali utilizzate maggiormente nel panorama delle costruzioni in c.a.

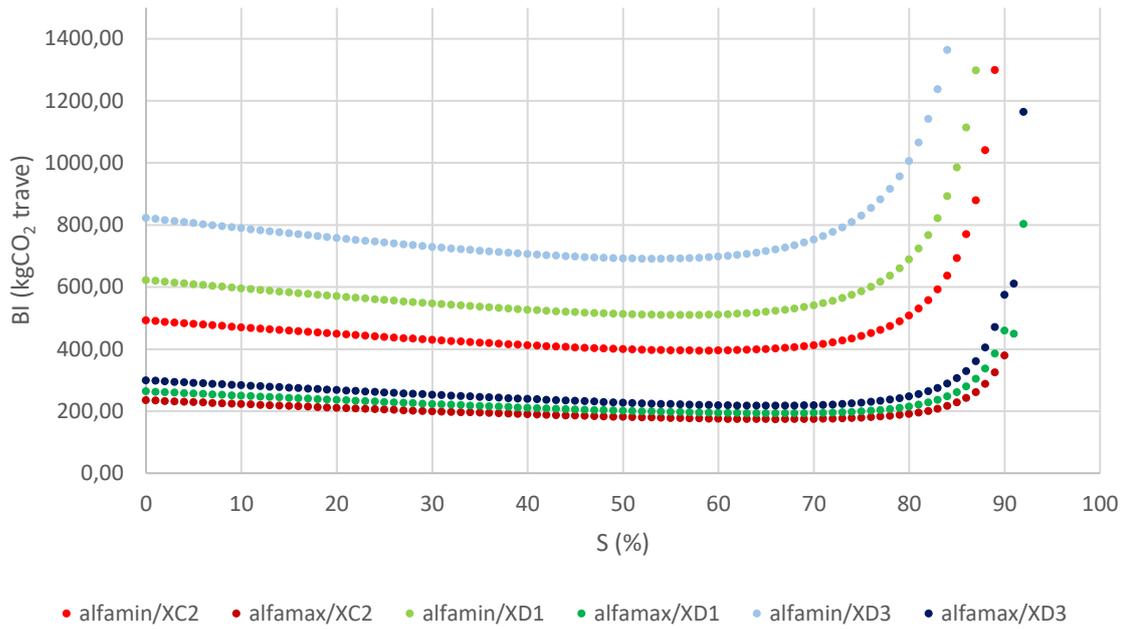


# ALLEGATO I. DIAGRAMMI BI-S

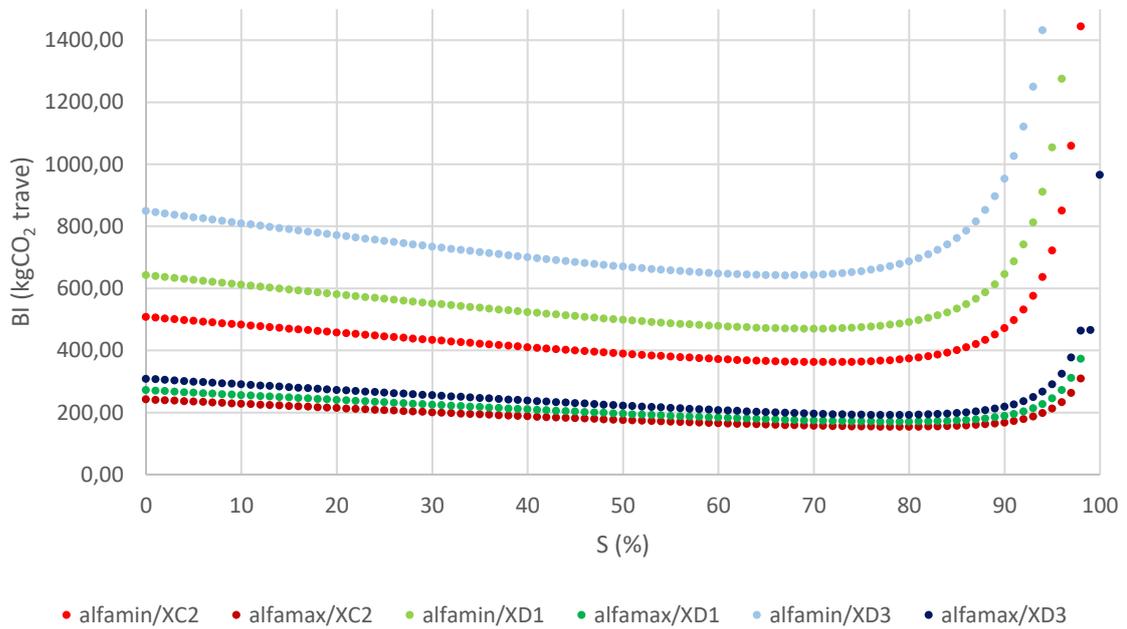
## 1. LUCE TRAVE: $L = 3\text{ m}$



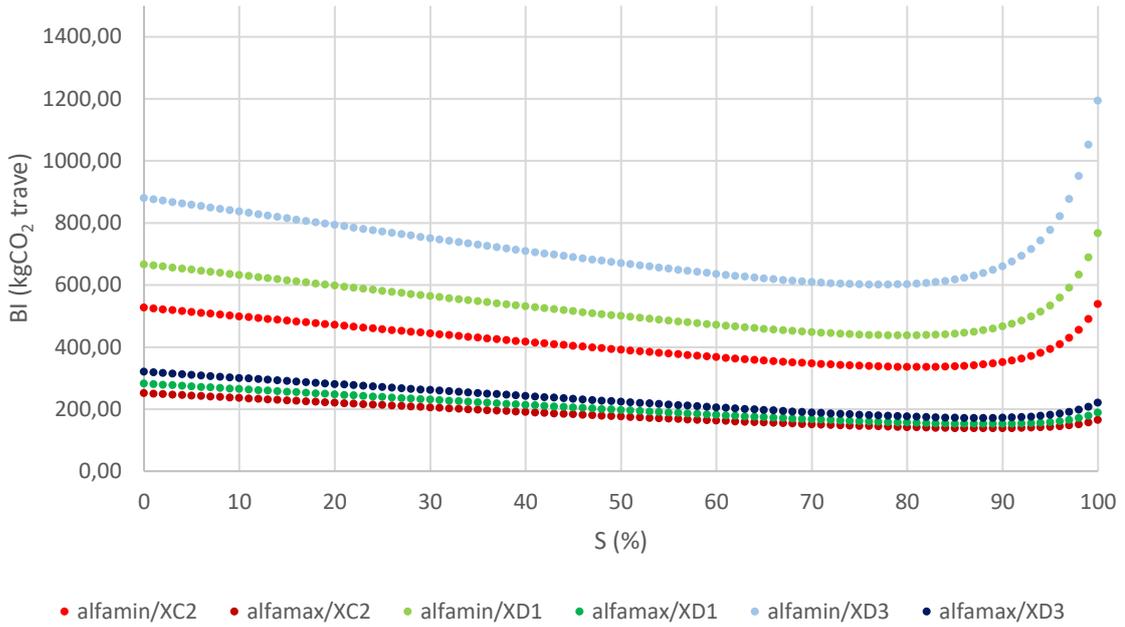
L=3 m,  $f_c=22$  MPa



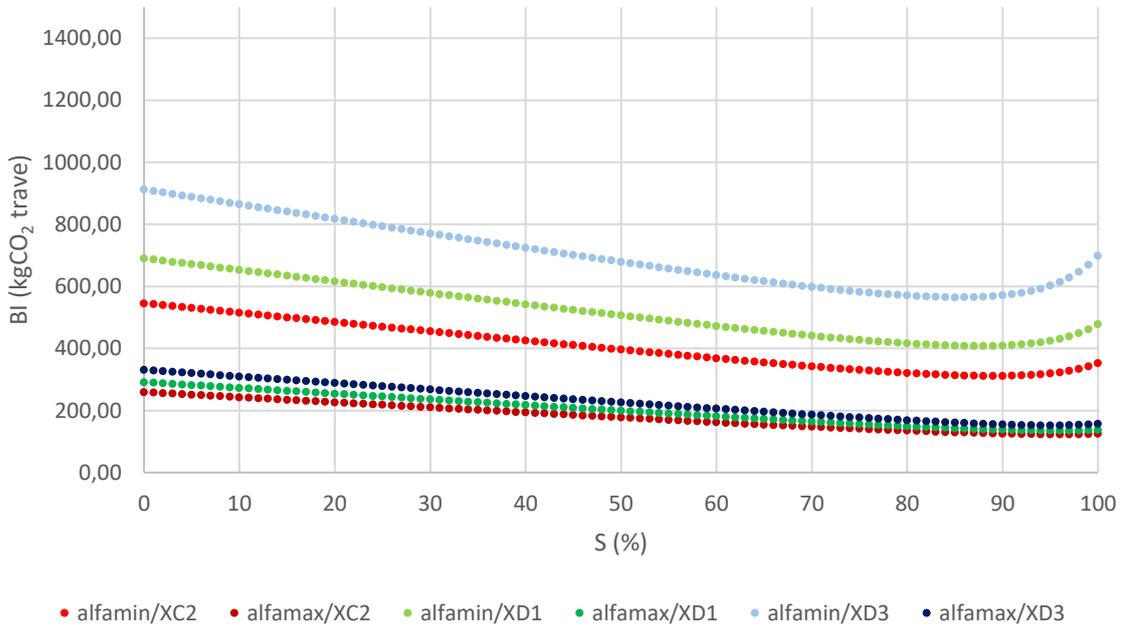
L=3 m,  $f_c=27$  MPa



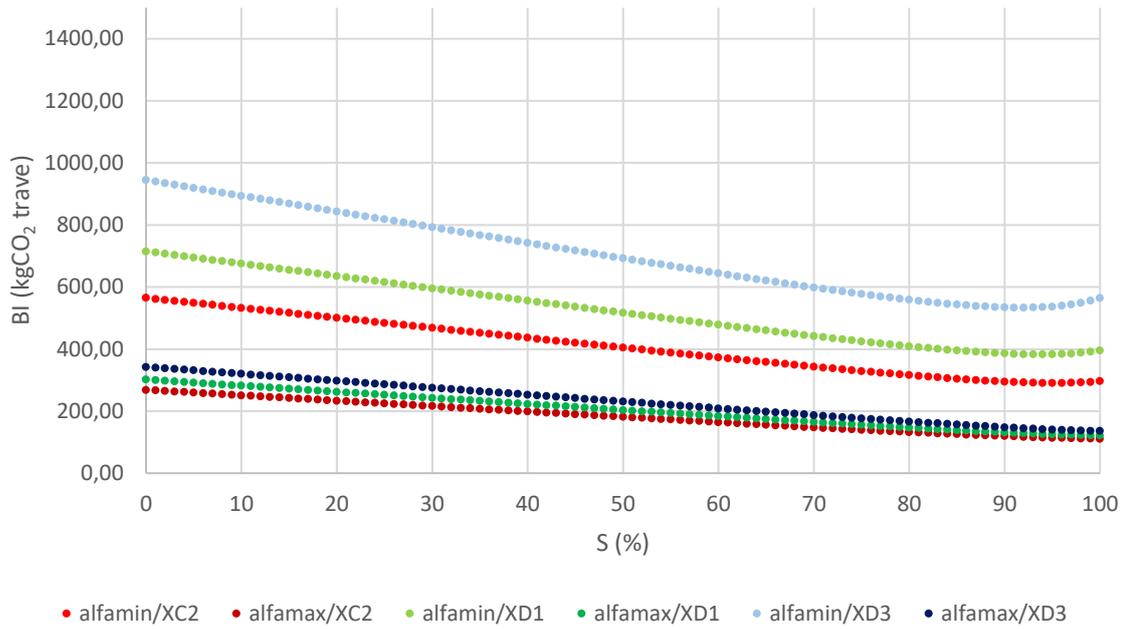
L=3 m,  $f_c=32$  MPa



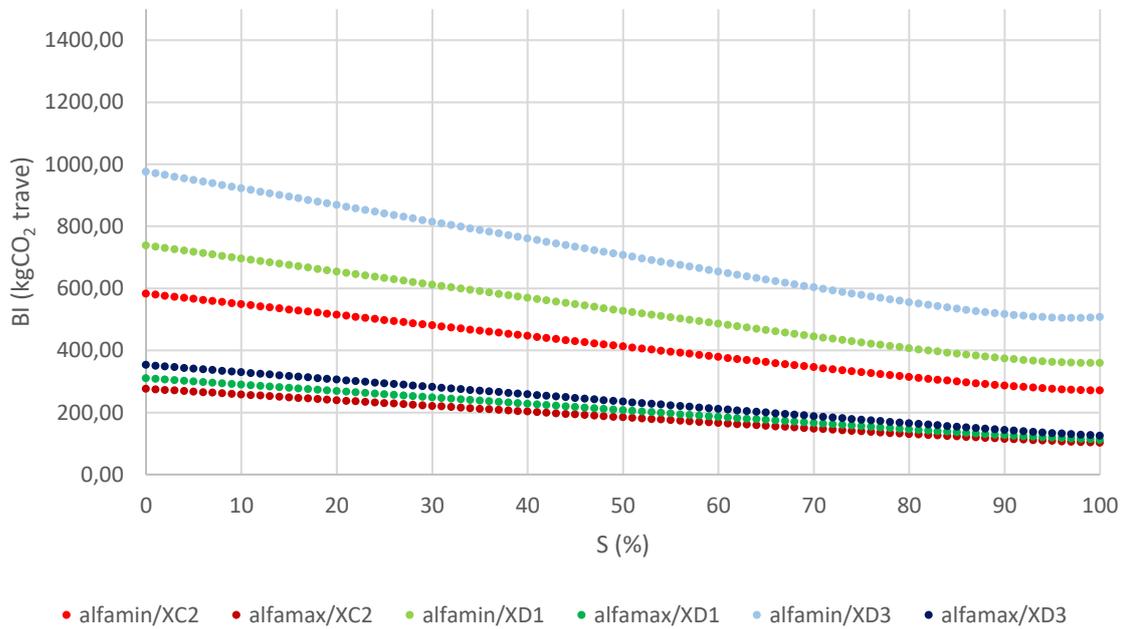
L=3 m,  $f_c=37$  MPa



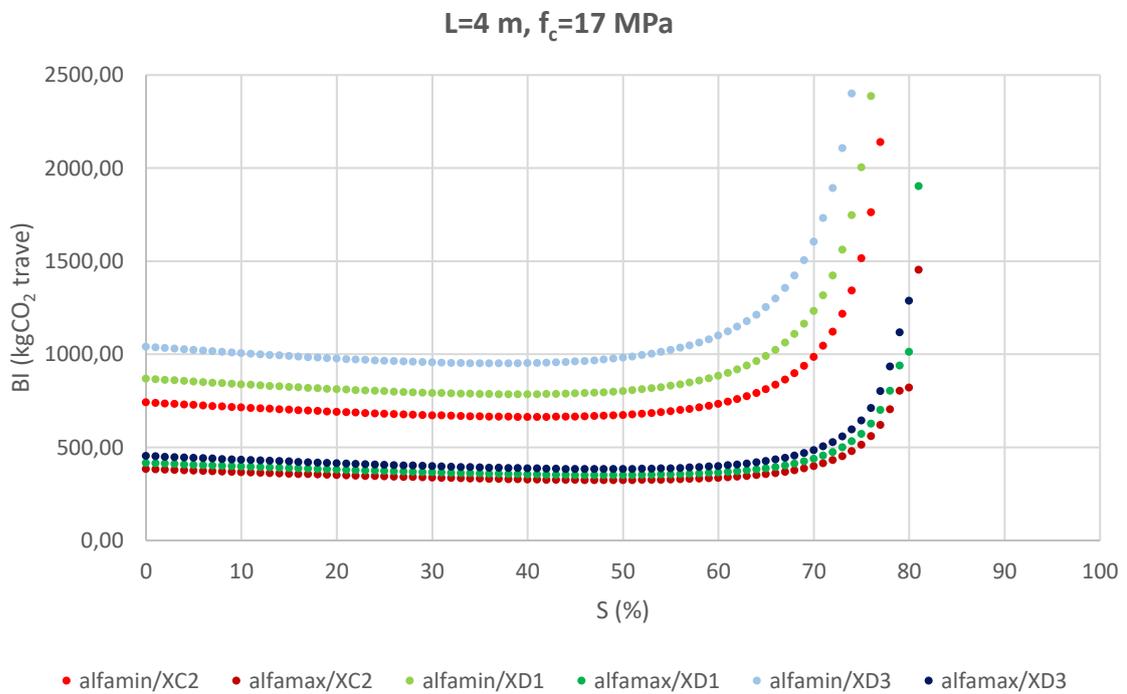
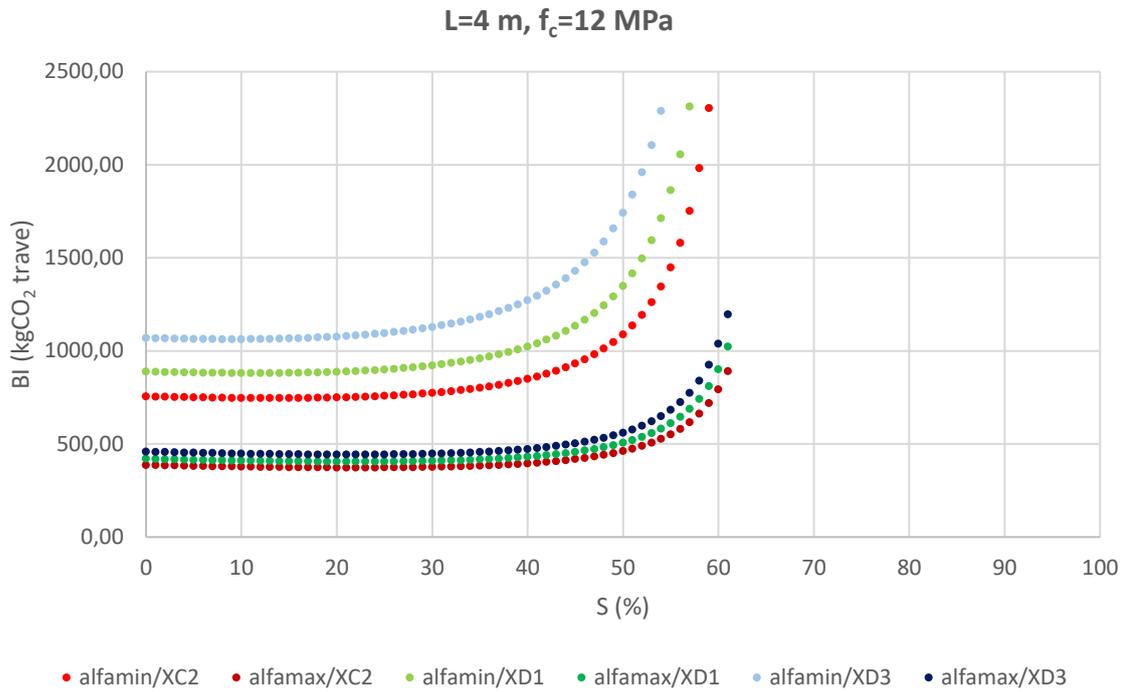
L=3 m,  $f_c=42$  MPa



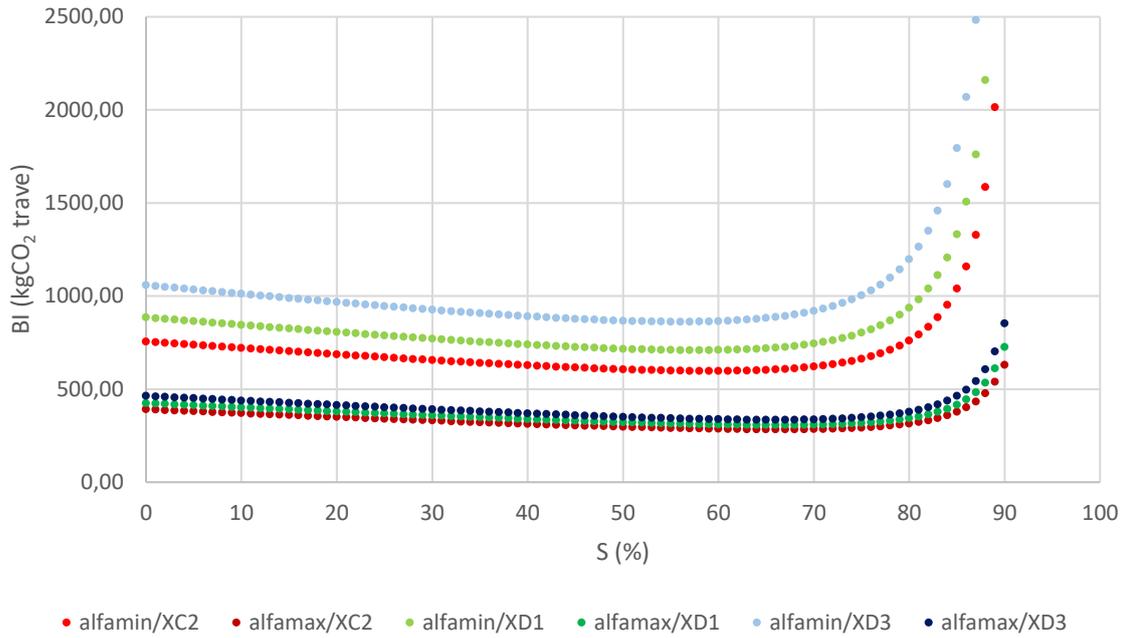
L=3 m,  $f_c=47$  MPa



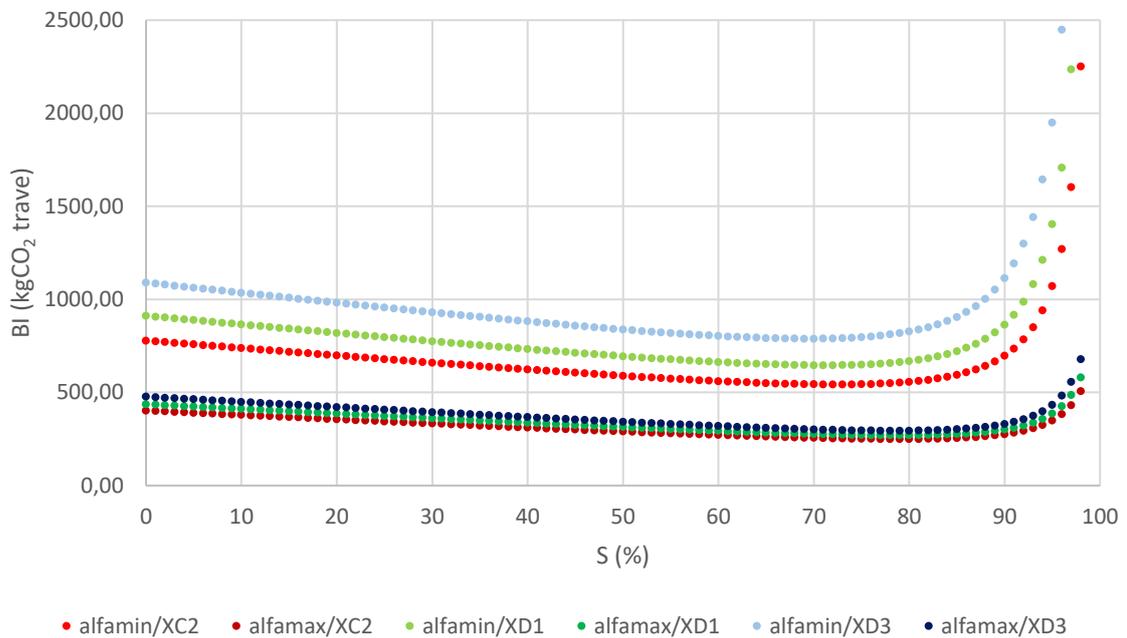
2. LUCE TRAVE:  $L = 4\text{ m}$



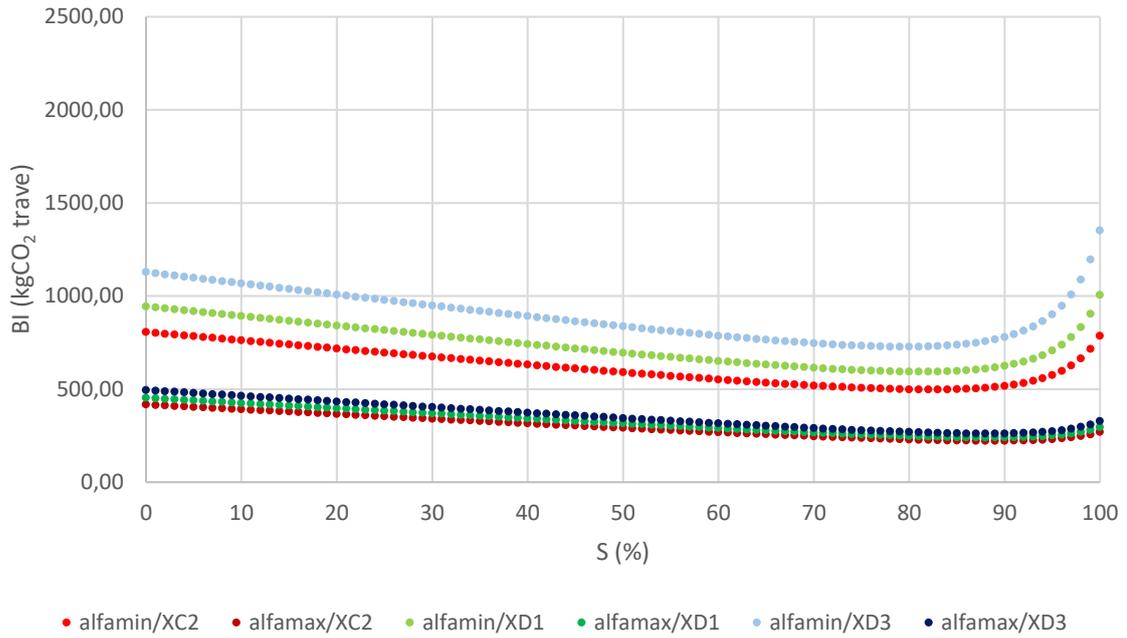
L=4 m,  $f_c=22$  MPa



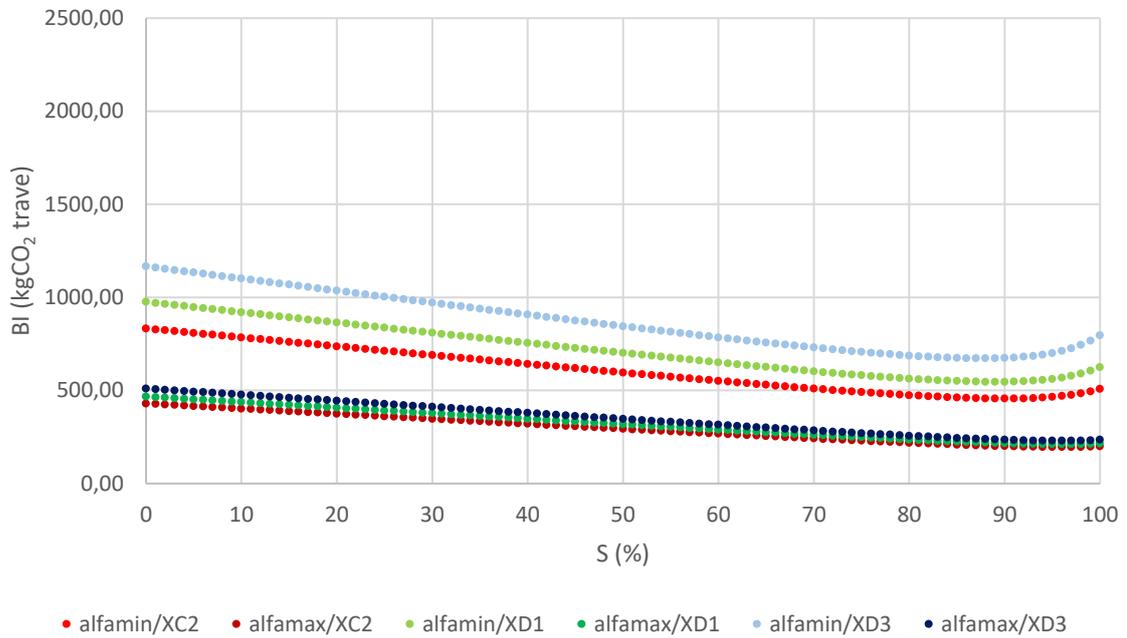
L=4 m,  $f_c=27$  MPa



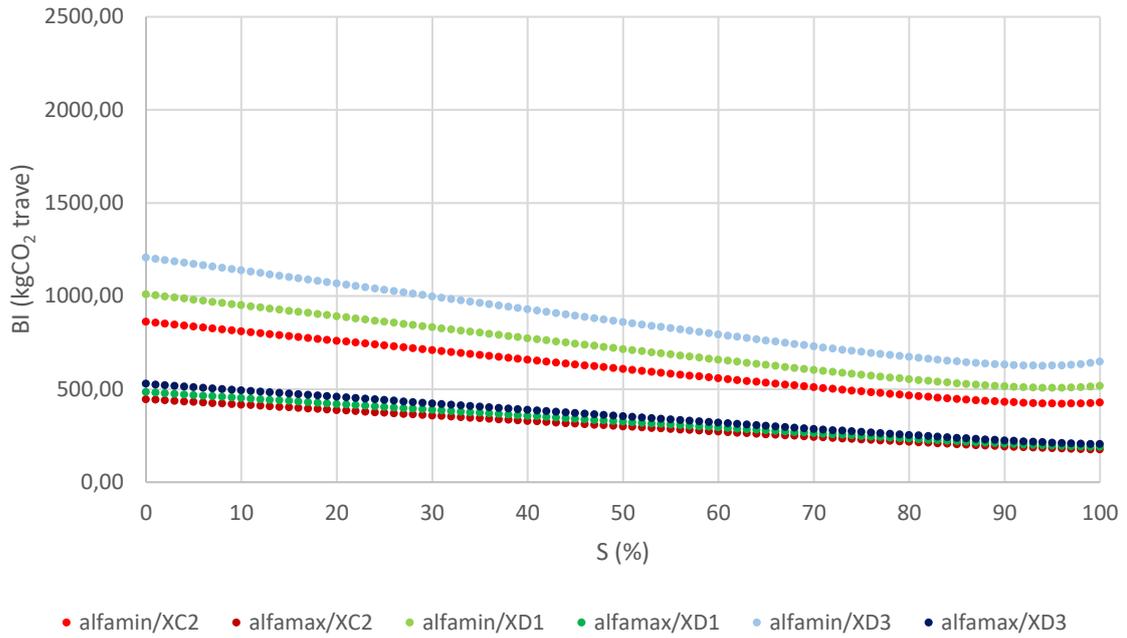
L=4 m,  $f_c=32$  MPa



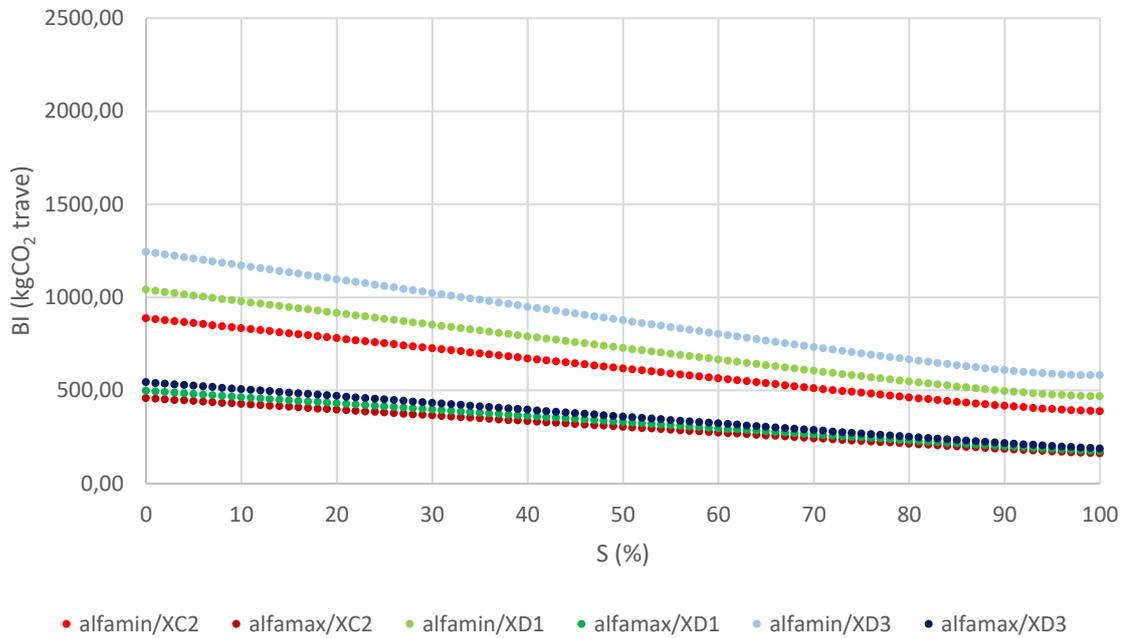
L=4 m,  $f_c=37$  MPa



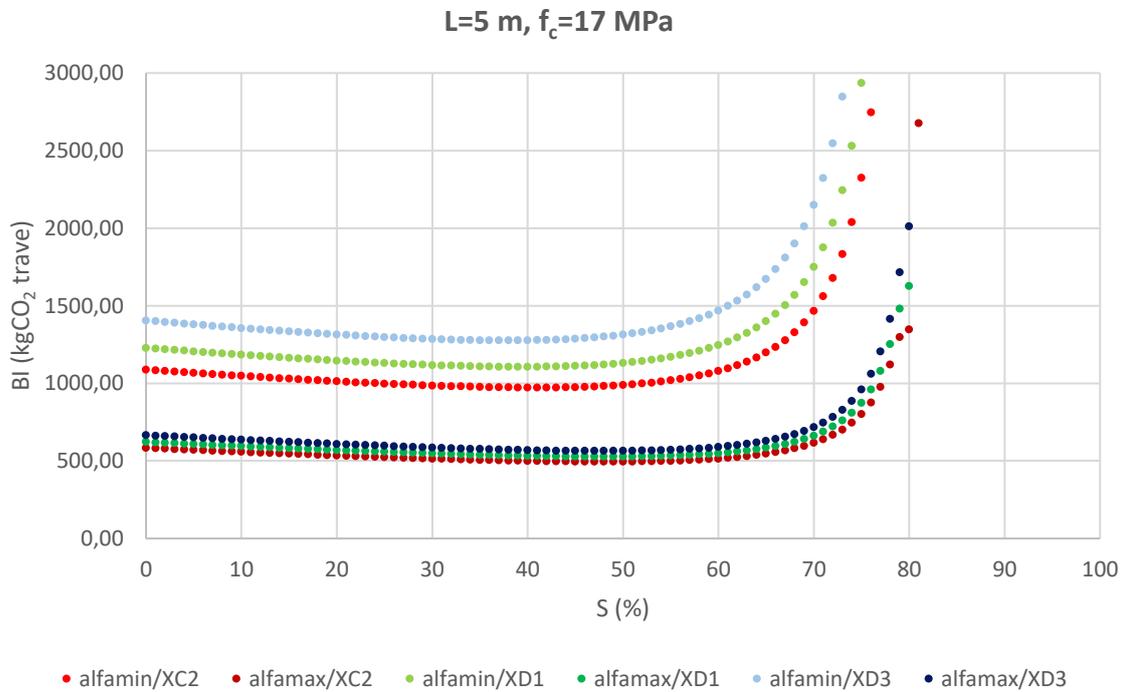
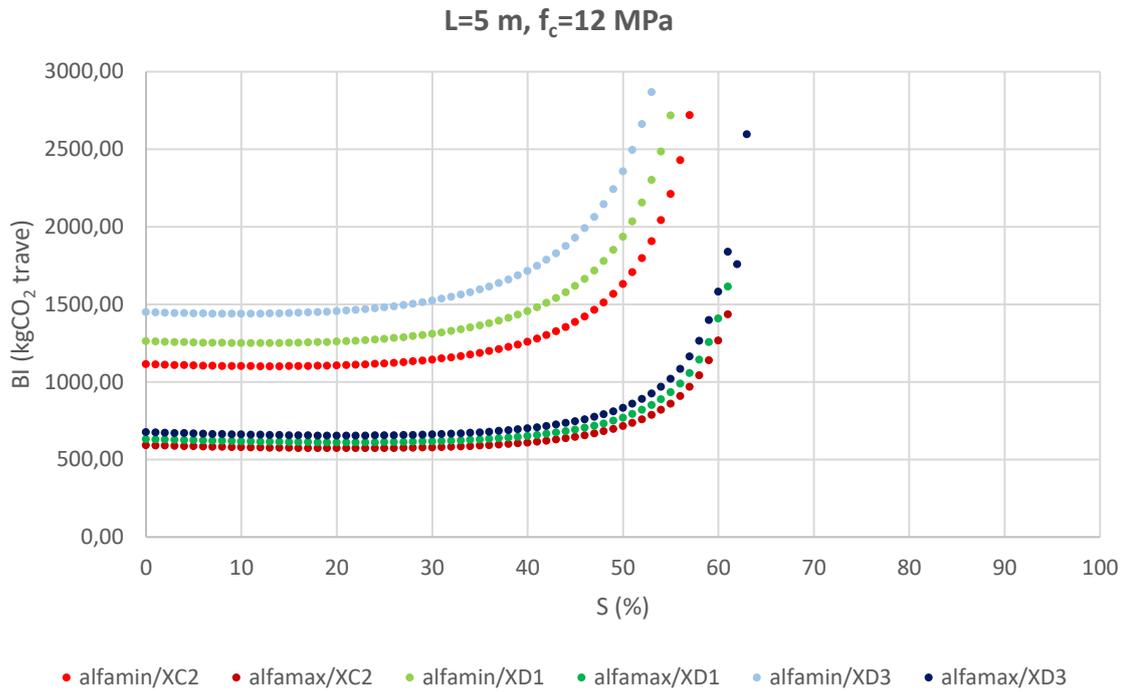
L=4 m,  $f_c=42$  MPa



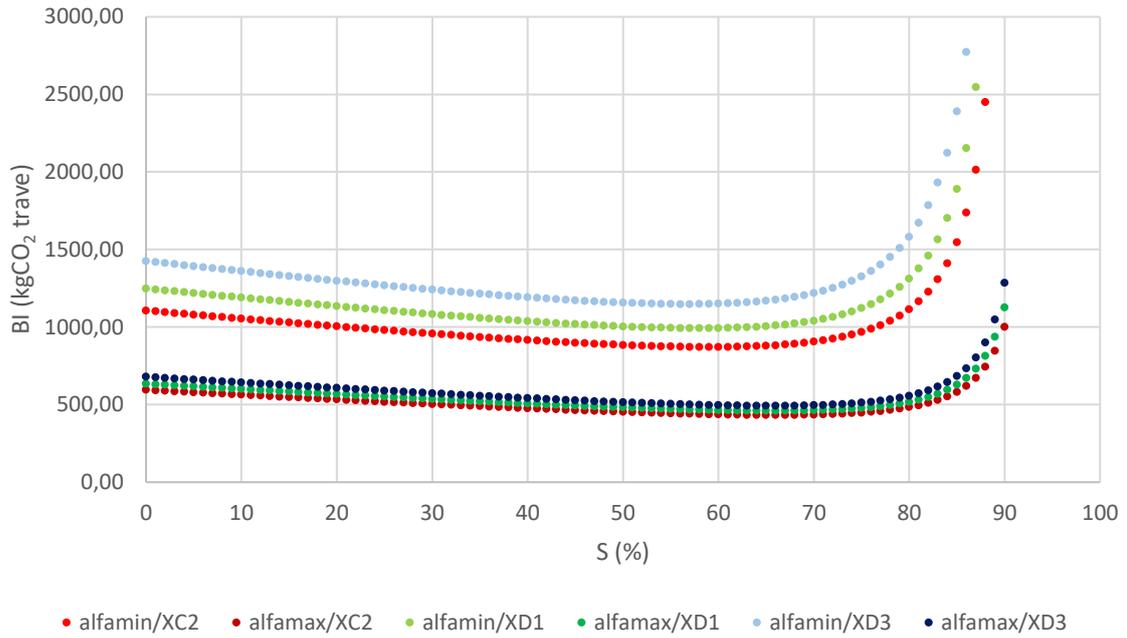
L=4 m,  $f_c=47$  MPa



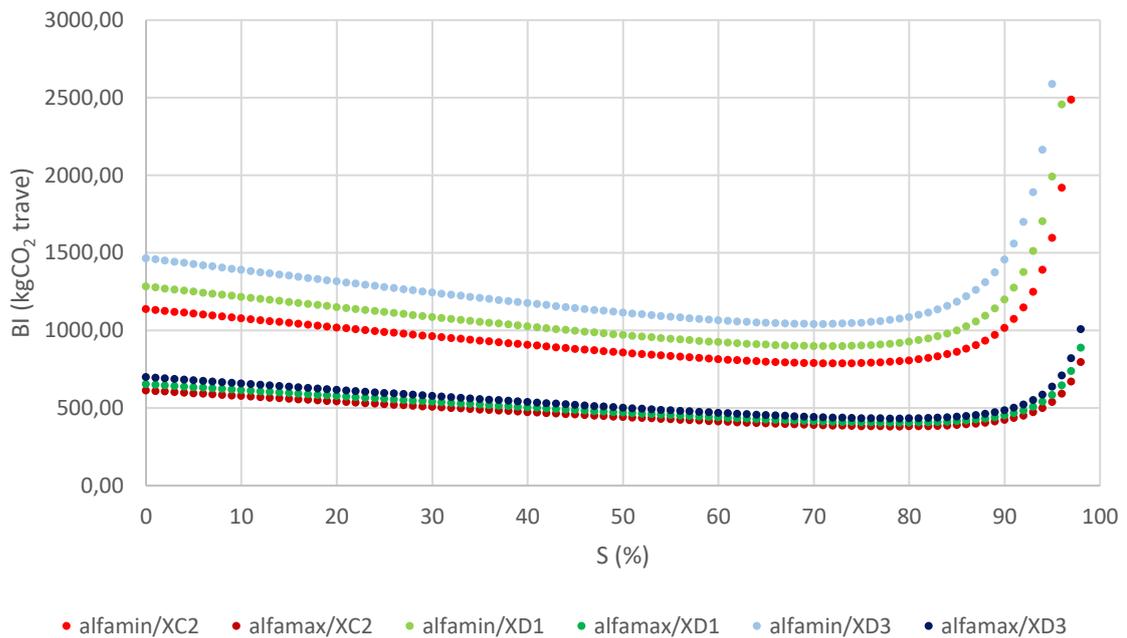
3. LUCE TRAVE:  $L = 5\text{ m}$



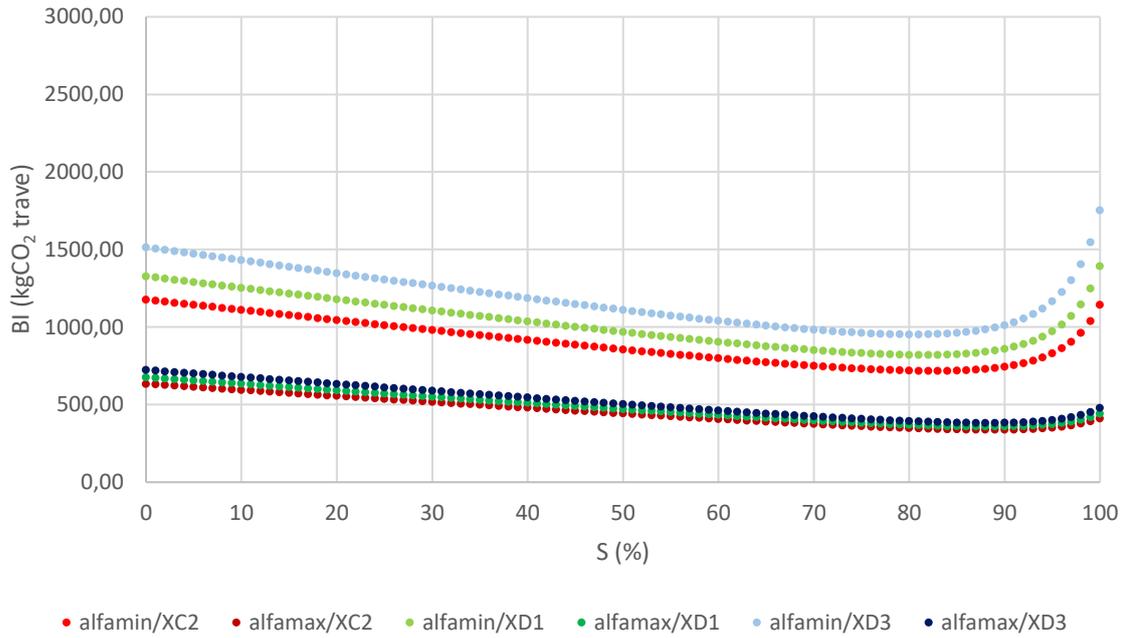
L=5 m,  $f_c=22$  MPa



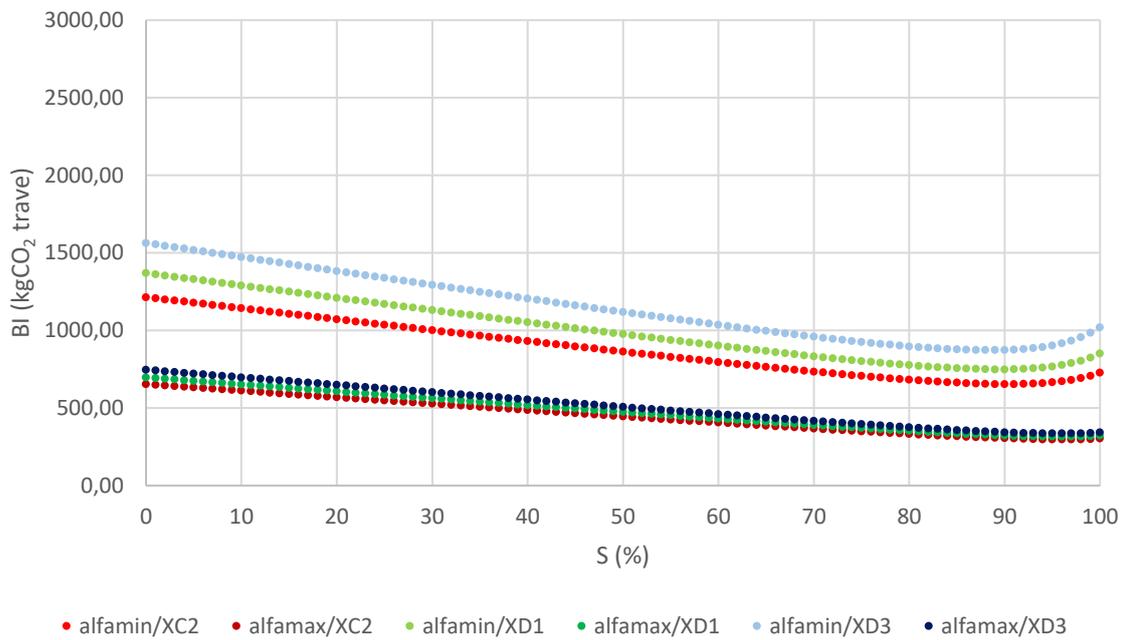
L=5 m,  $f_c=27$  MPa



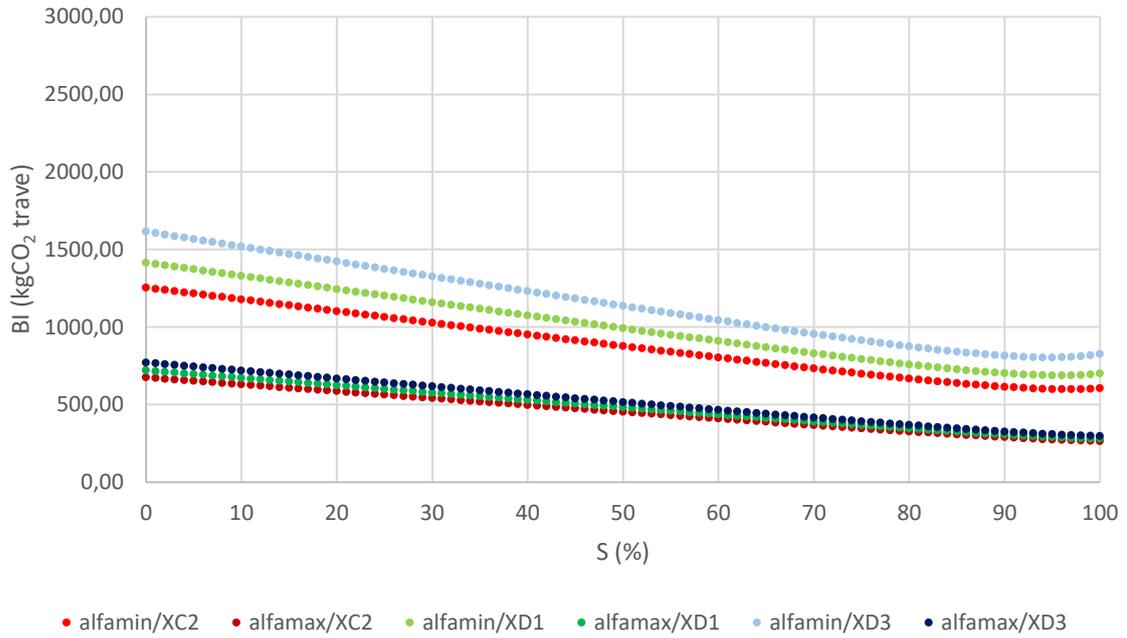
L=5 m,  $f_c=32$  MPa



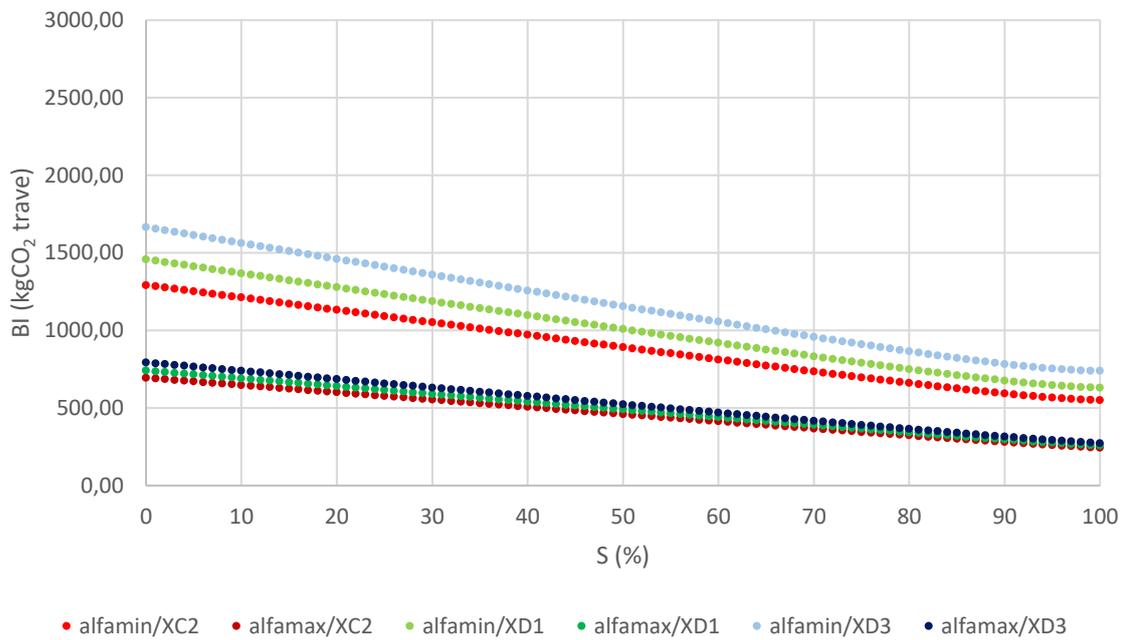
L=5 m,  $f_c=37$  MPa



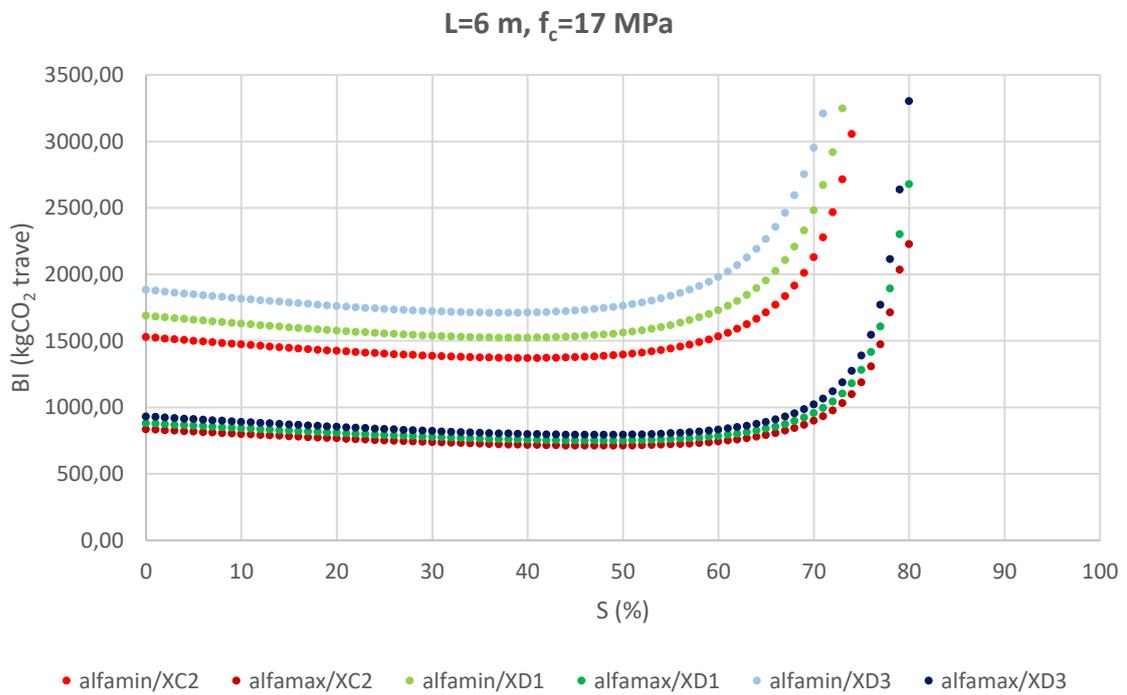
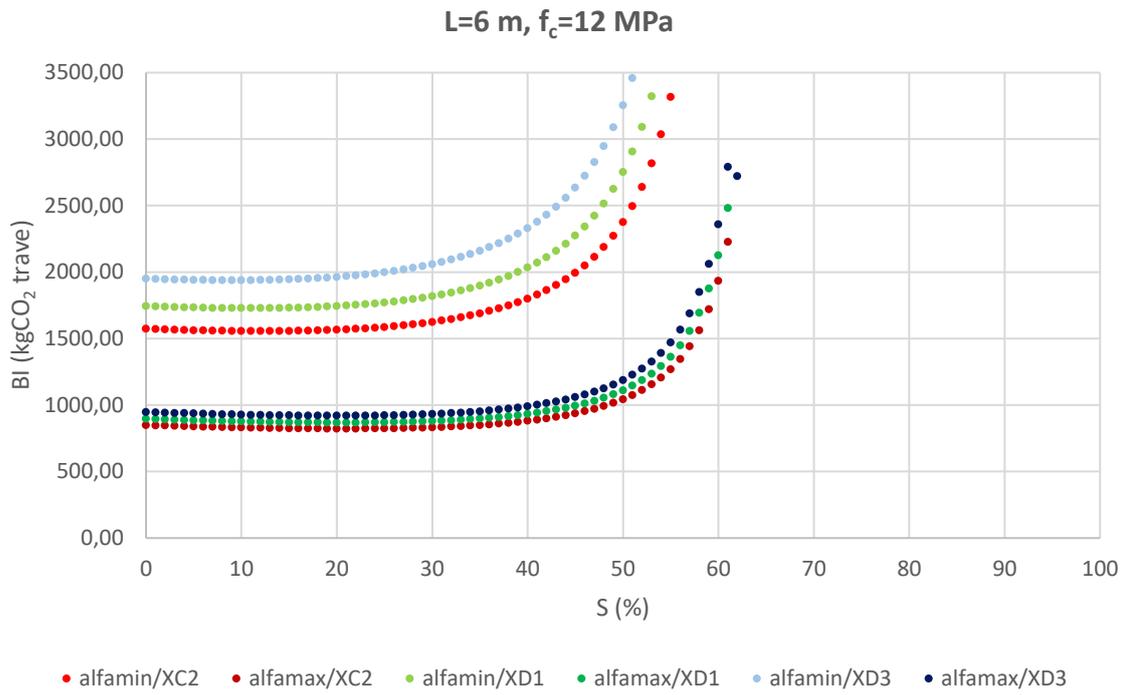
L=5 m,  $f_c=42$  MPa



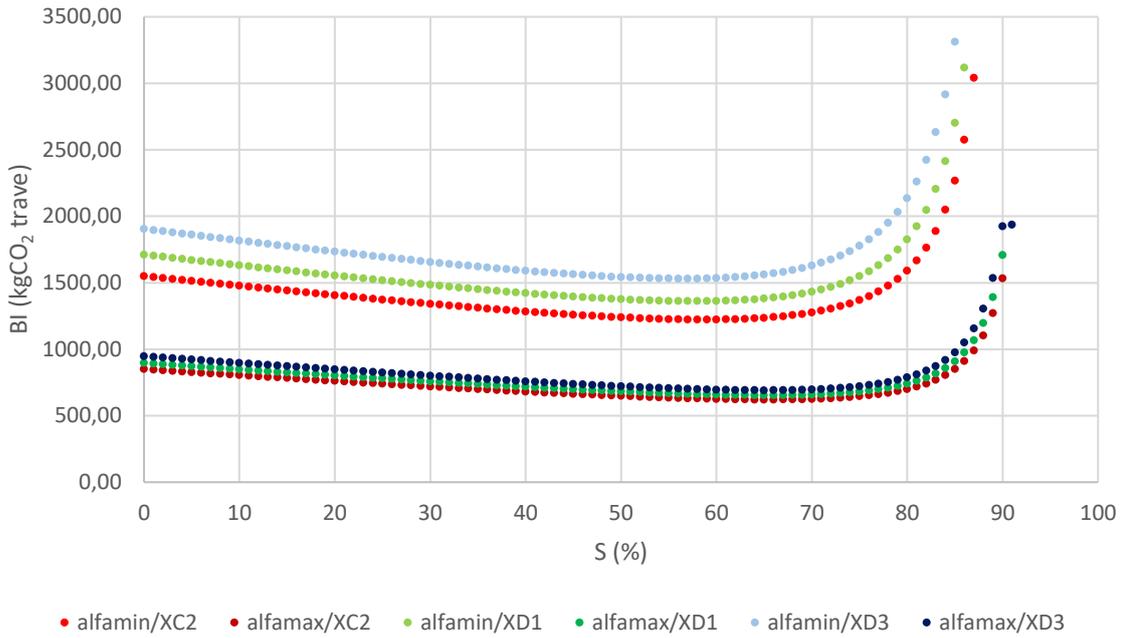
L=5 m,  $f_c=47$  MPa



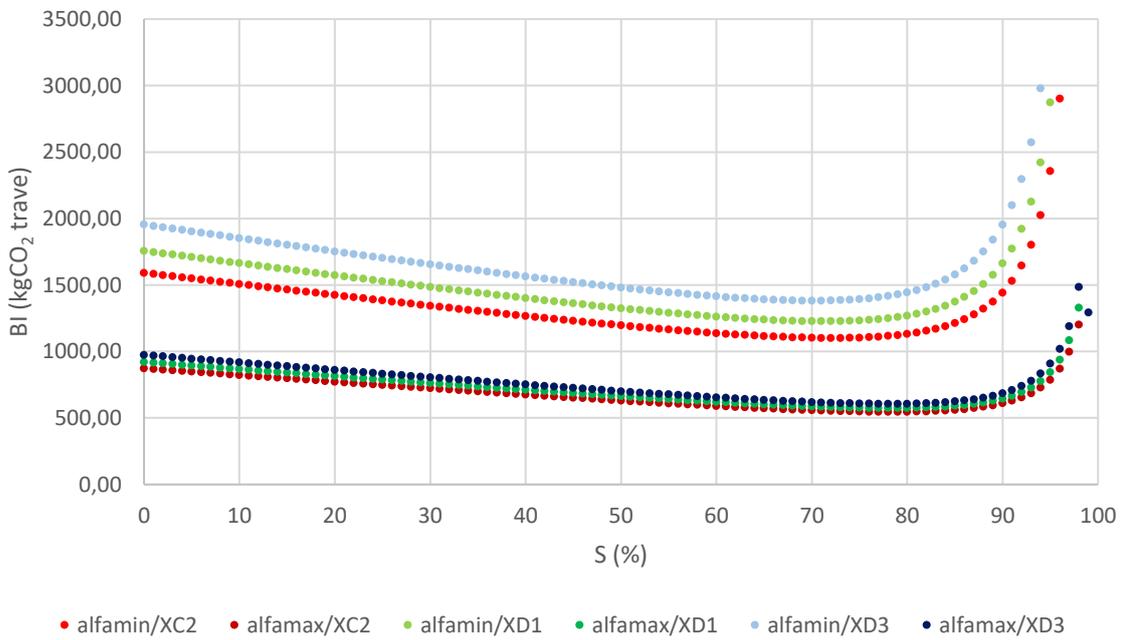
4. LUCE TRAVE:  $L = 6\text{ m}$



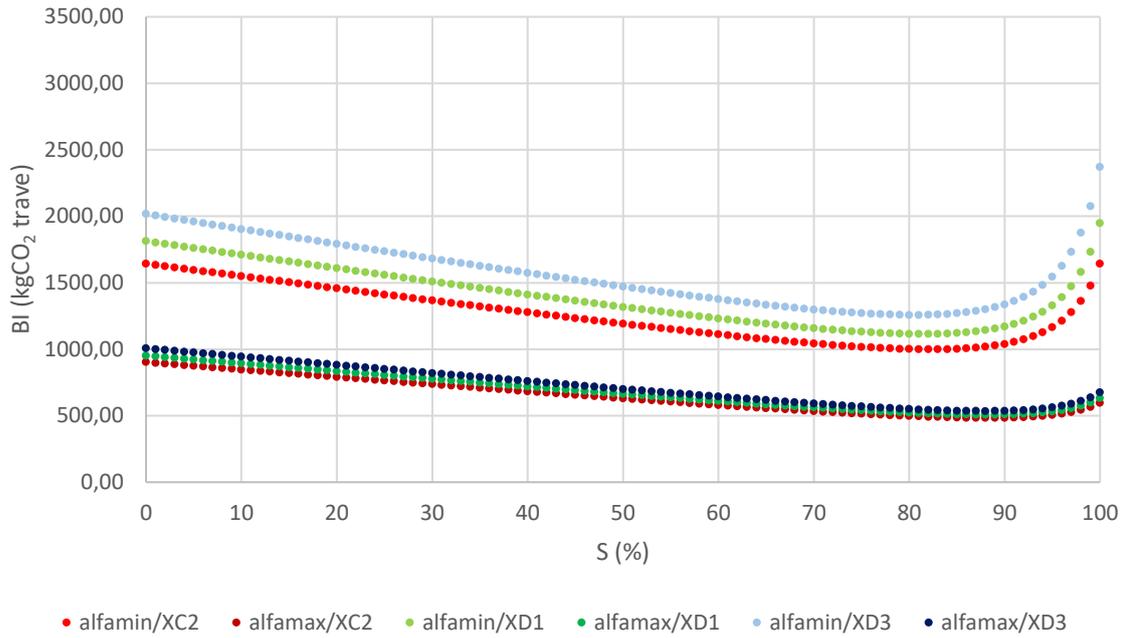
L=6 m,  $f_c=22$  MPa



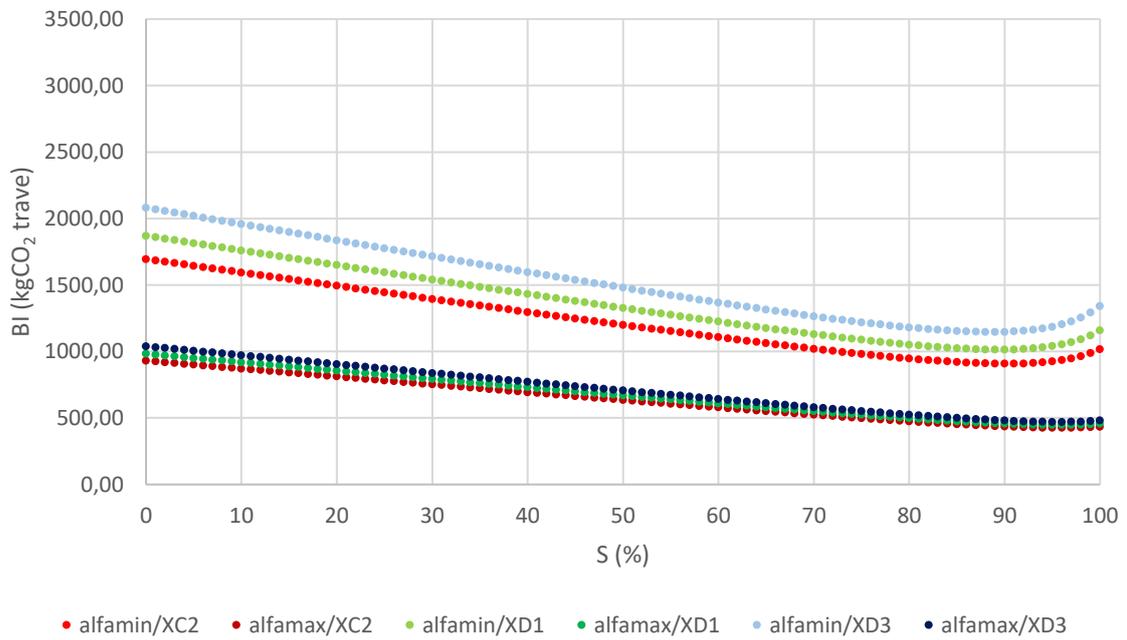
L=6 m,  $f_c=27$  MPa



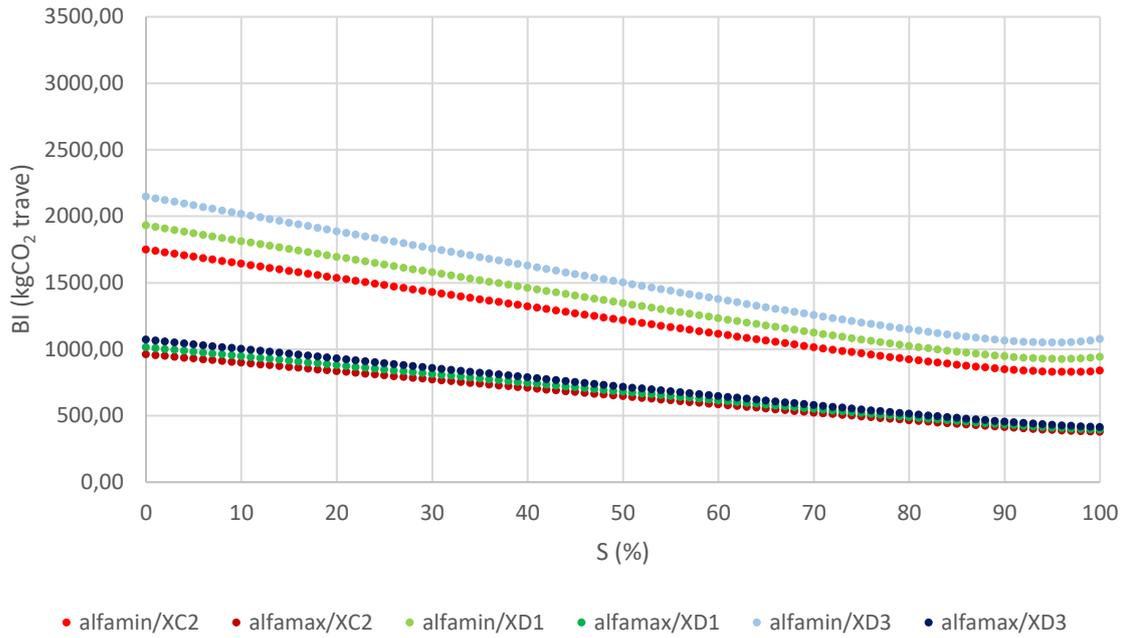
L=6 m,  $f_c=32$  MPa



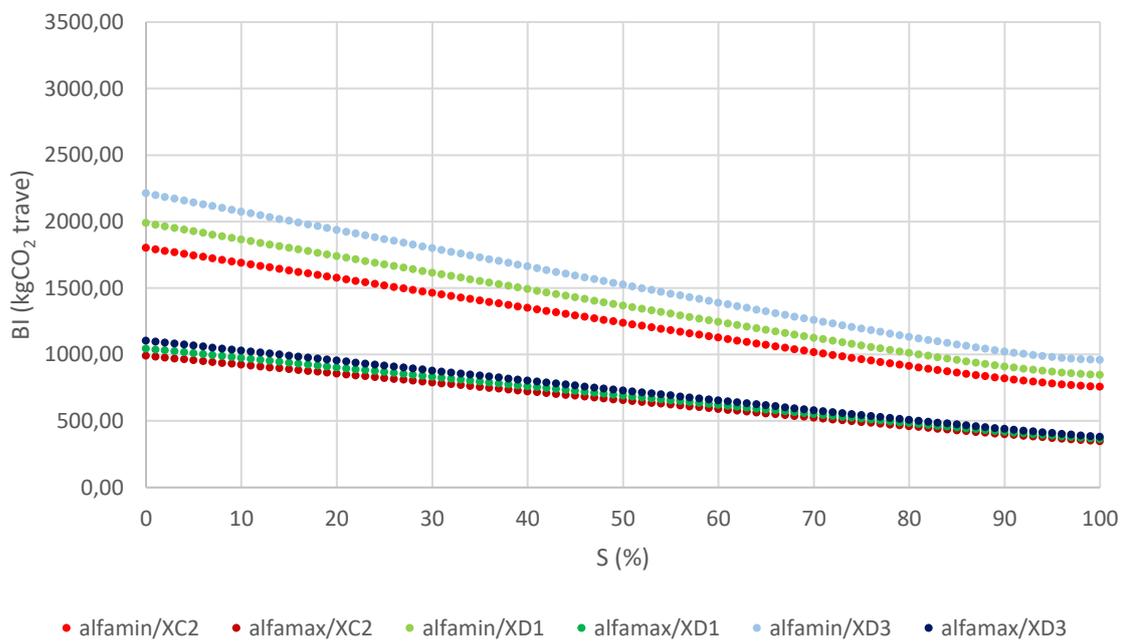
L=6 m,  $f_c=37$  MPa



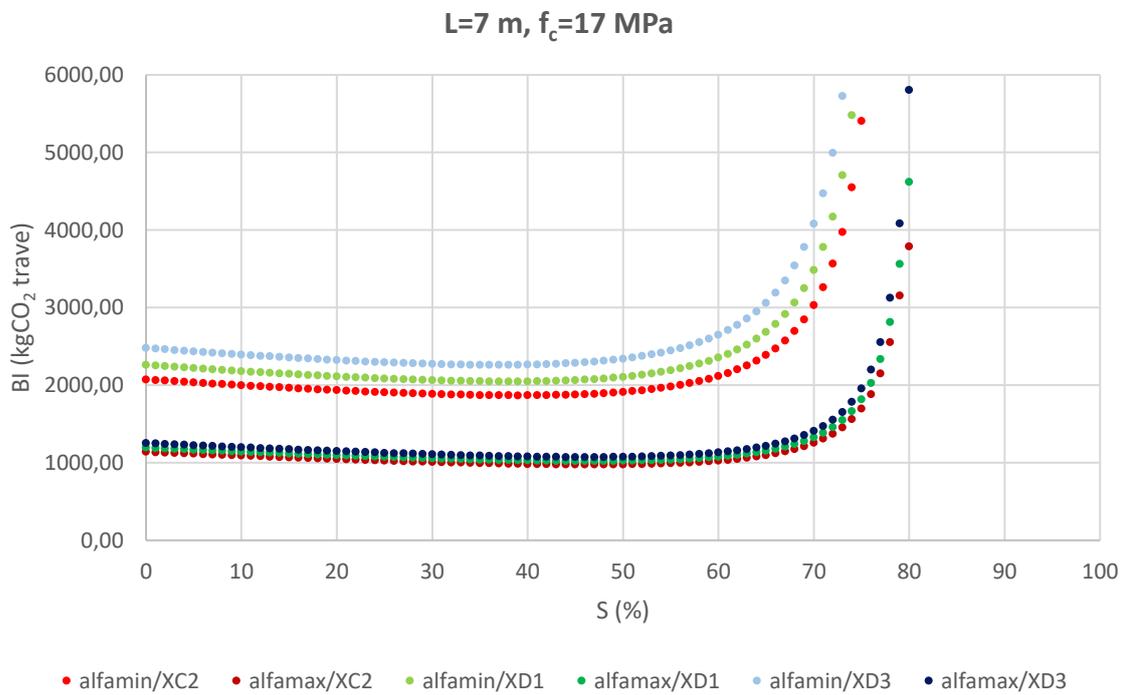
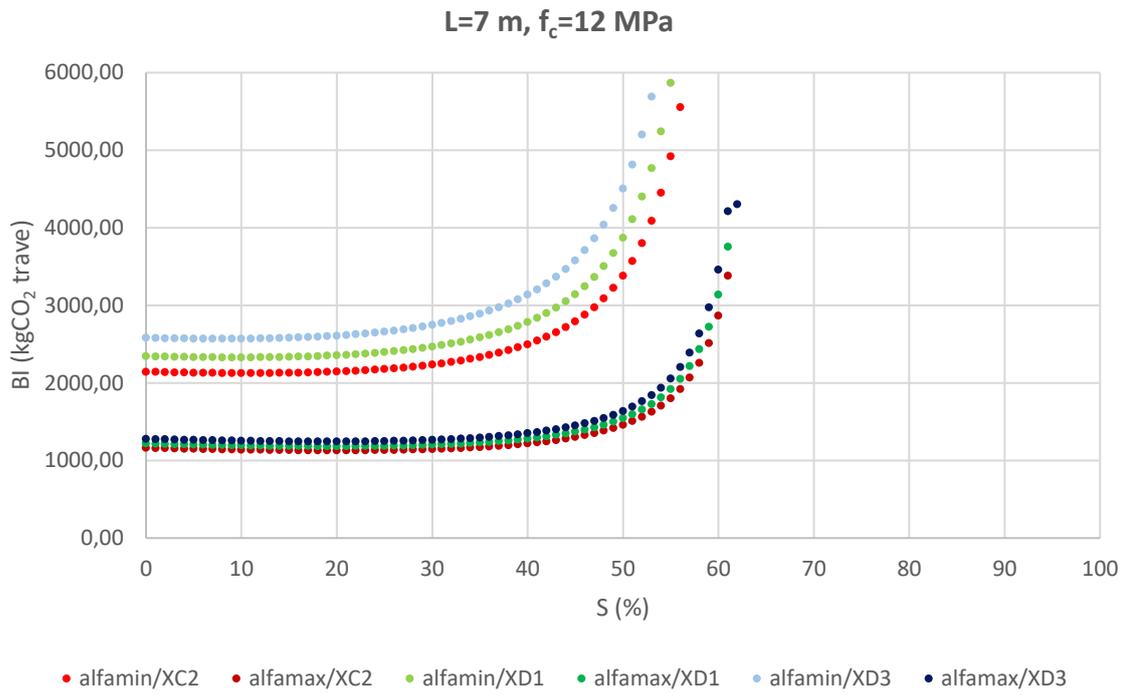
L=6 m,  $f_c=42$  MPa



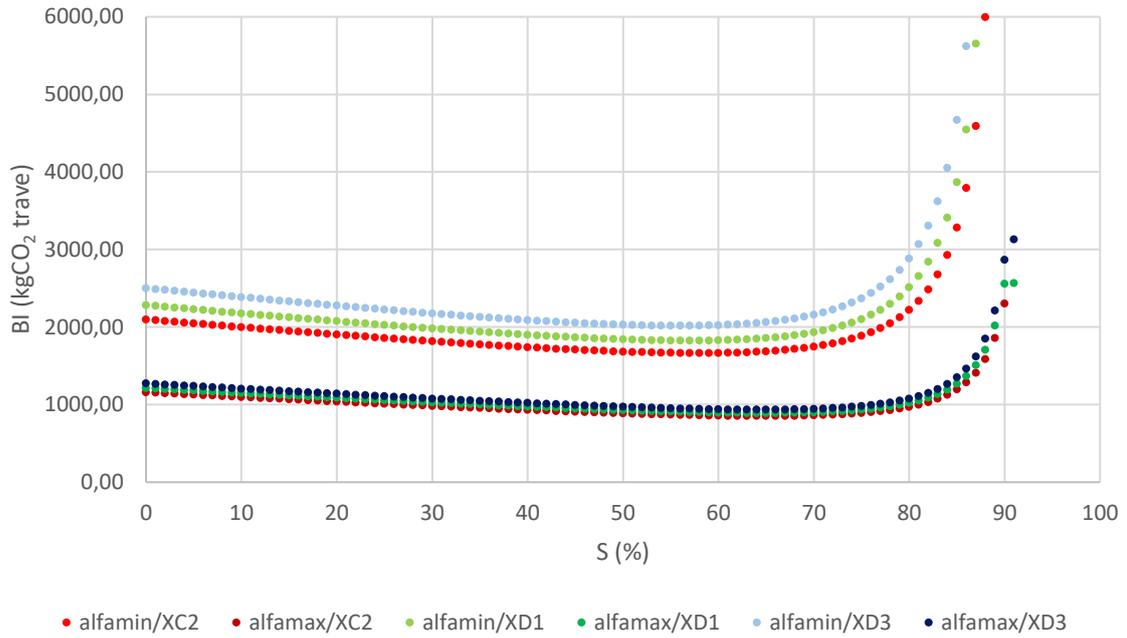
L=6 m,  $f_c=47$  MPa



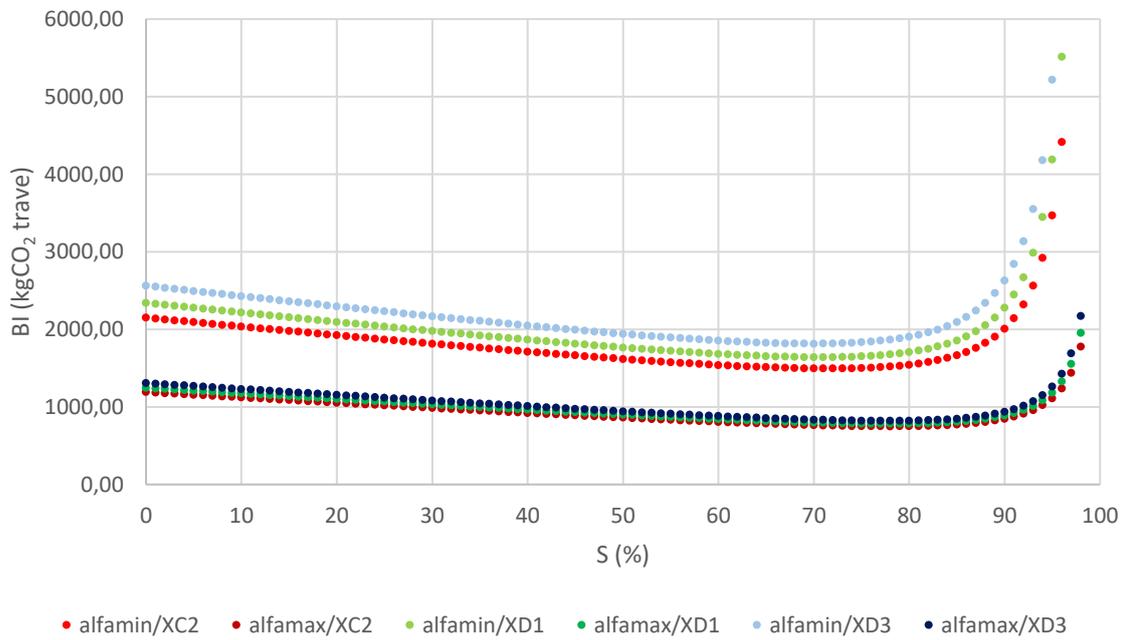
5. LUCE TRAVE:  $L = 7\text{ m}$



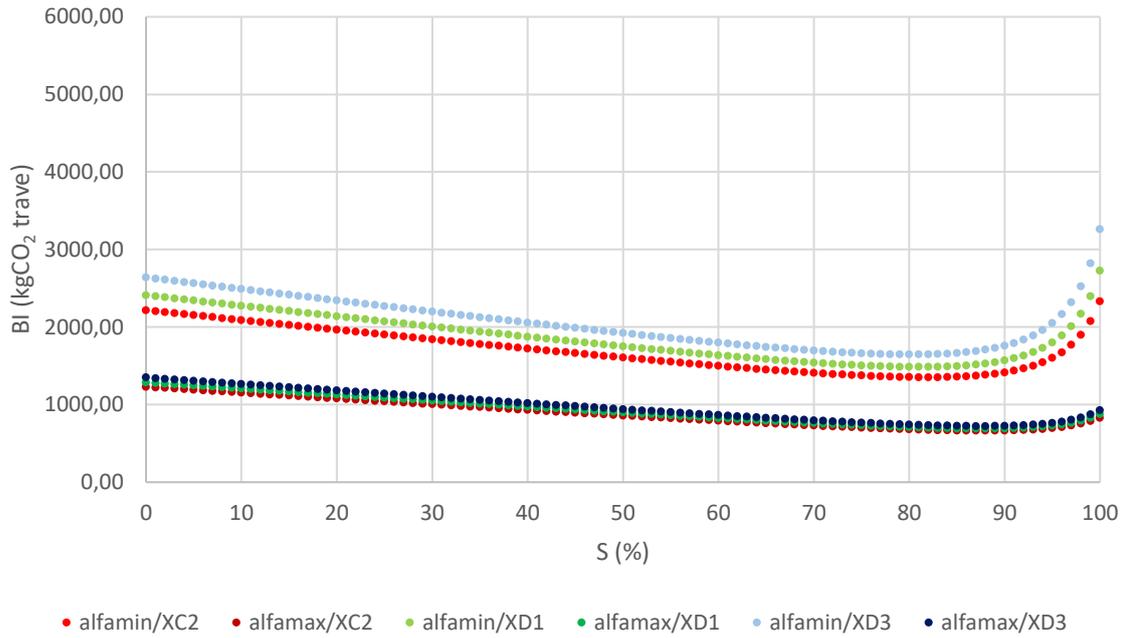
L=7 m,  $f_c=22$  MPa



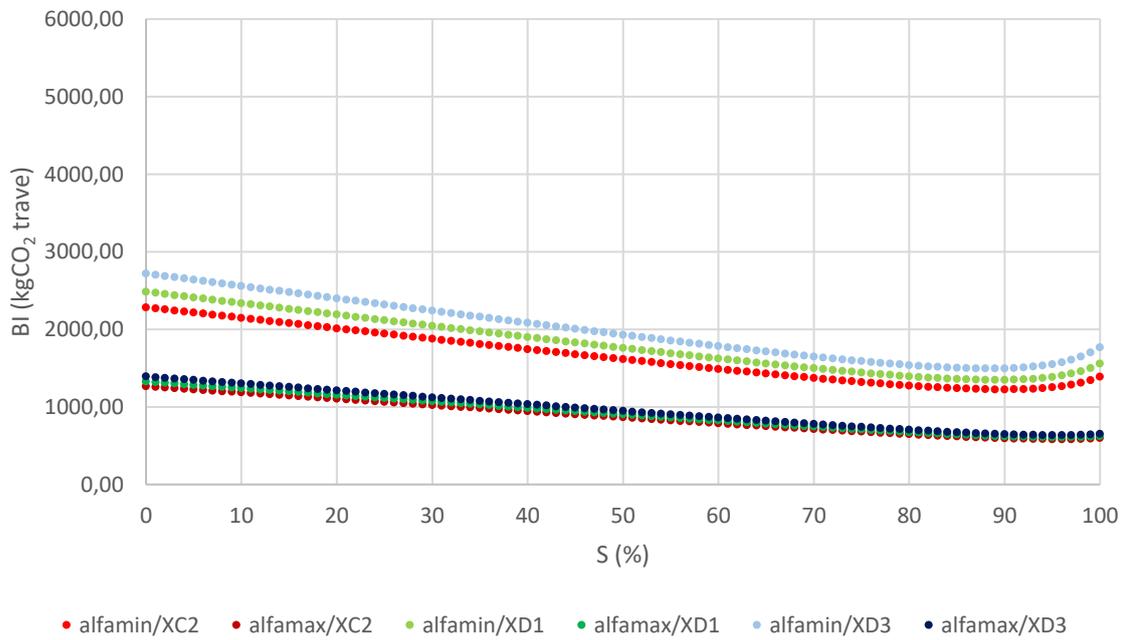
L=7 m,  $f_c=27$  MPa



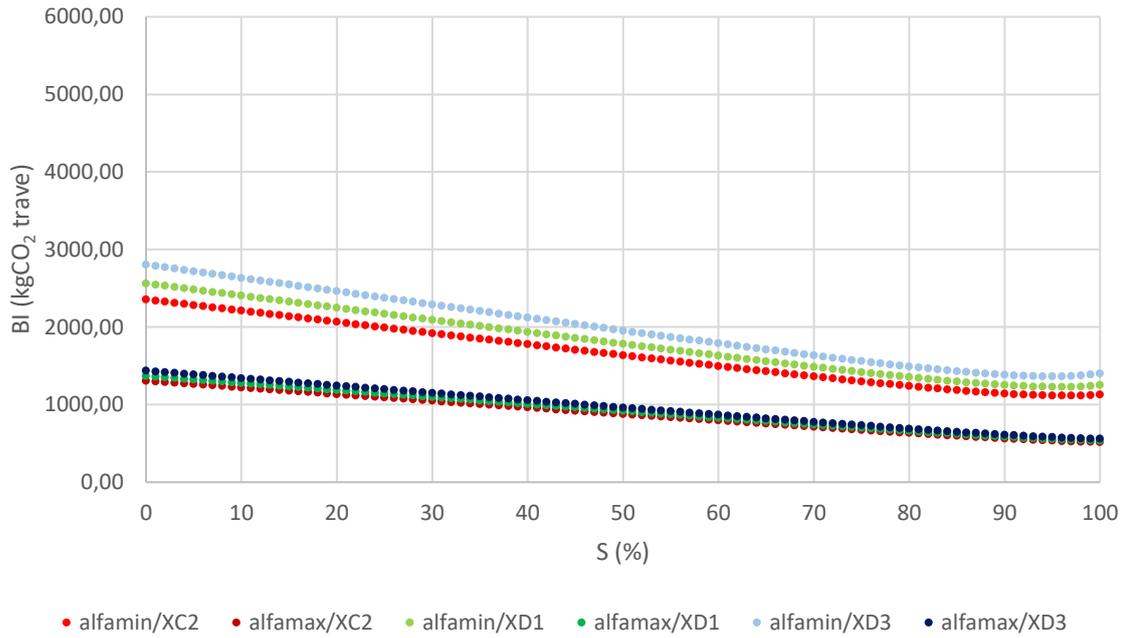
L=7 m,  $f_c=32$  MPa



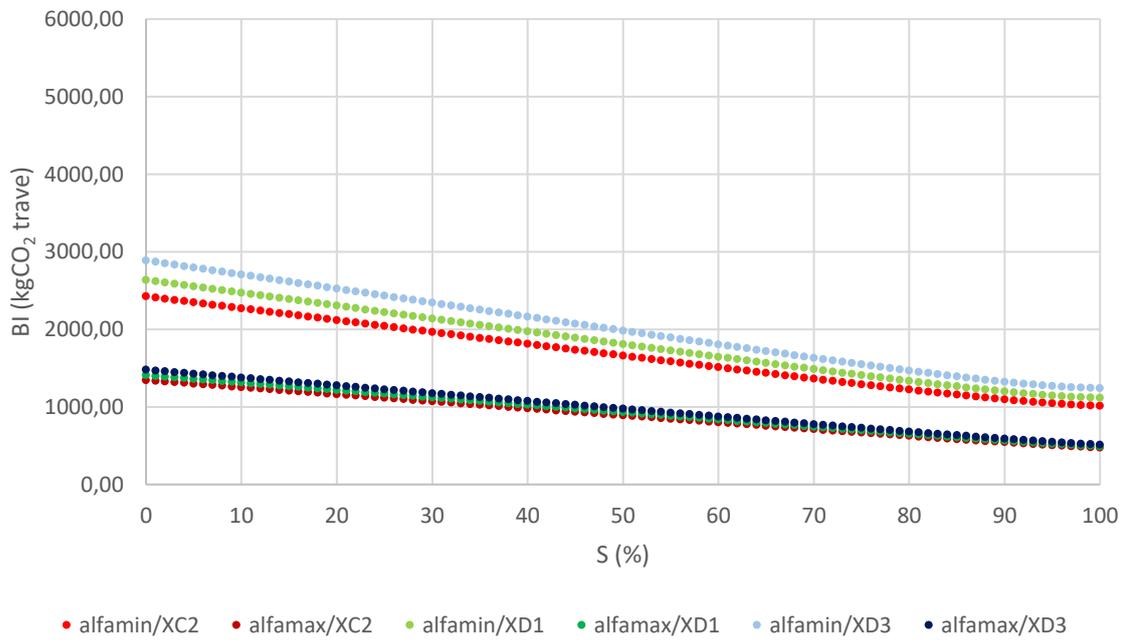
L=7 m,  $f_c=37$  MPa



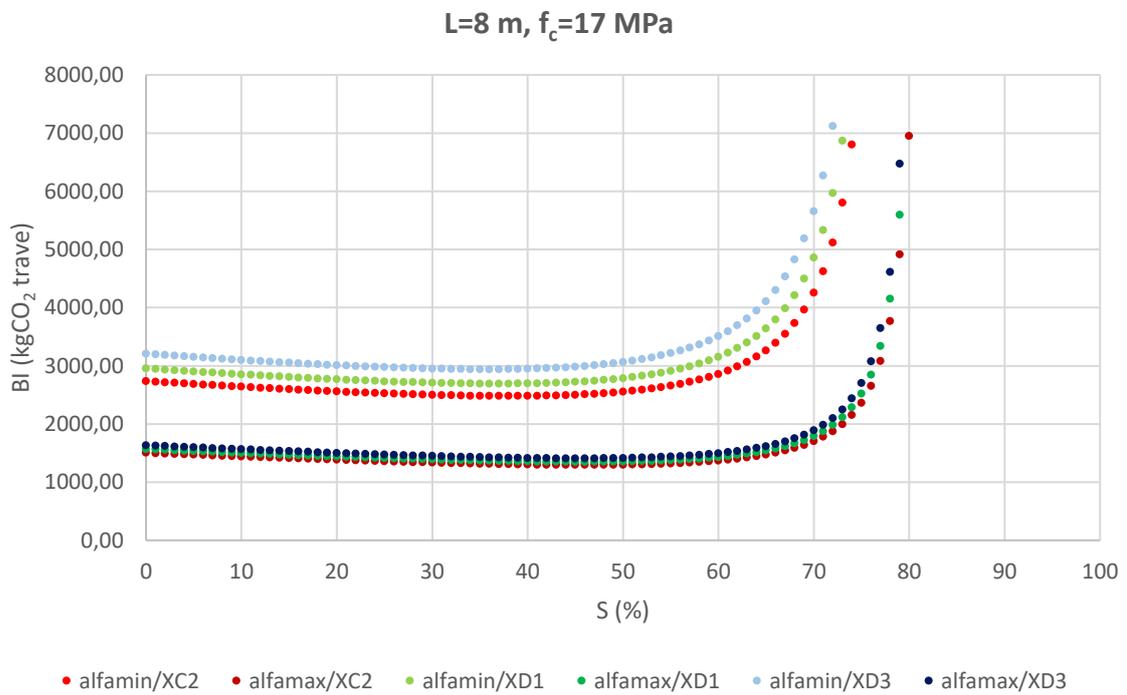
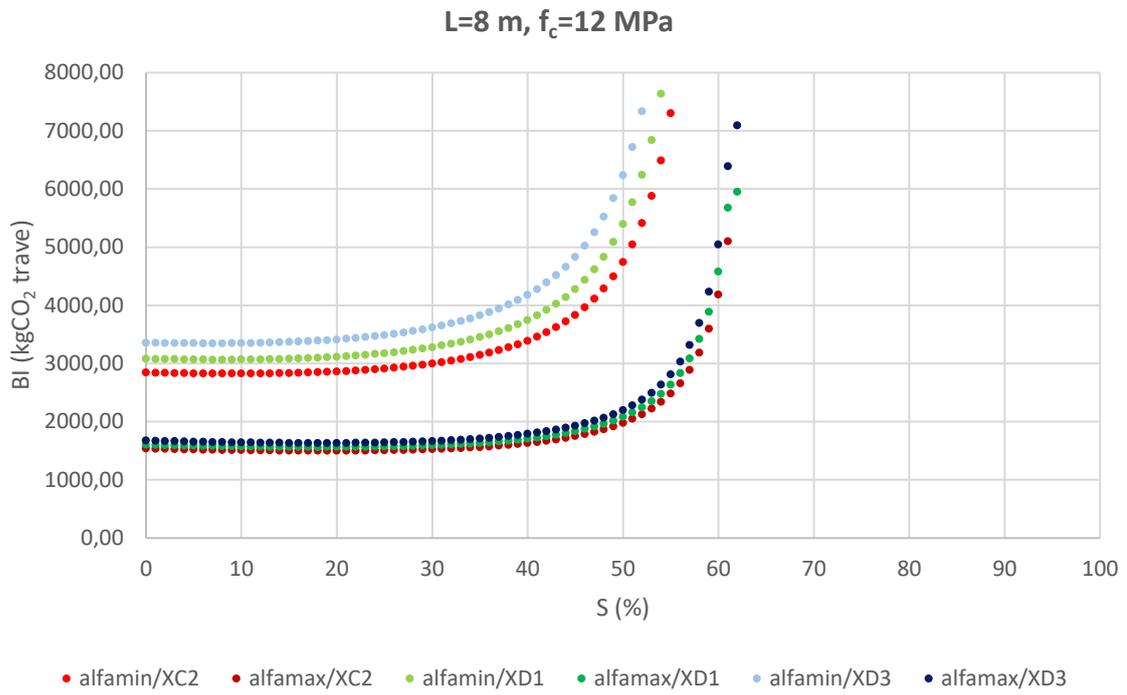
L=7 m,  $f_c=42$  MPa



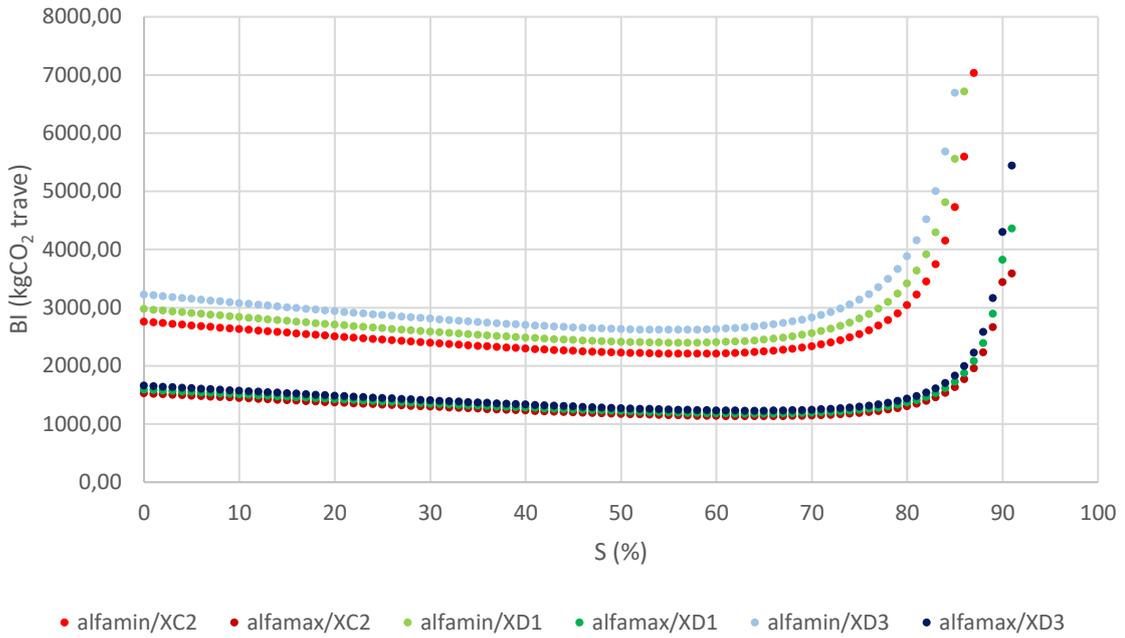
L=7 m,  $f_c=47$  MPa



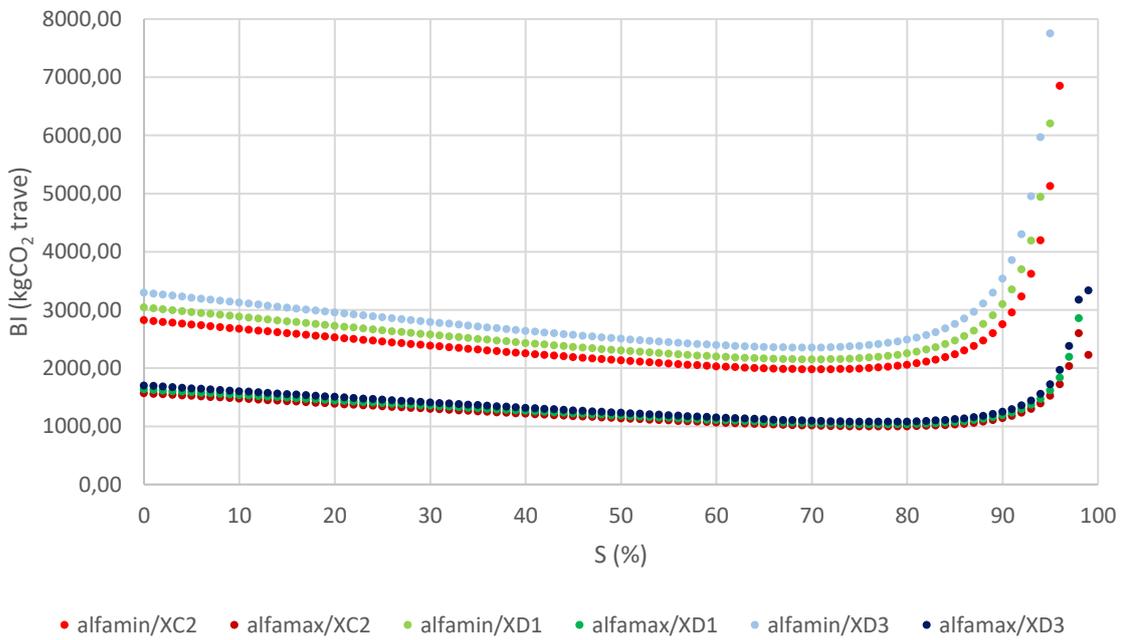
6. LUCE TRAVE:  $L = 8\text{ m}$



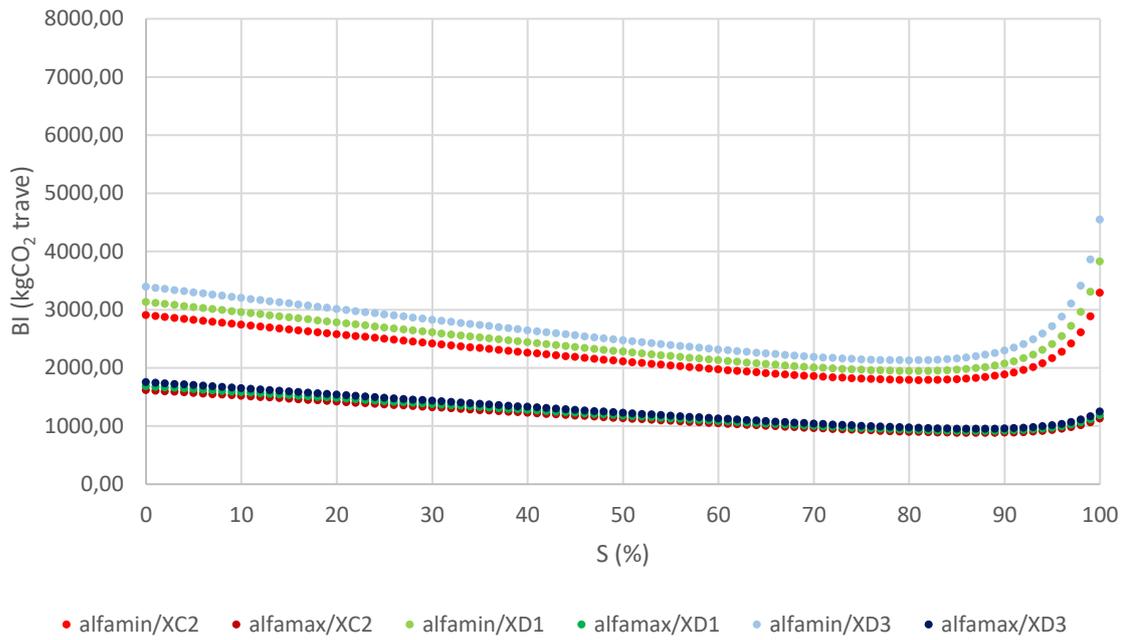
L=8 m,  $f_c=22$  MPa



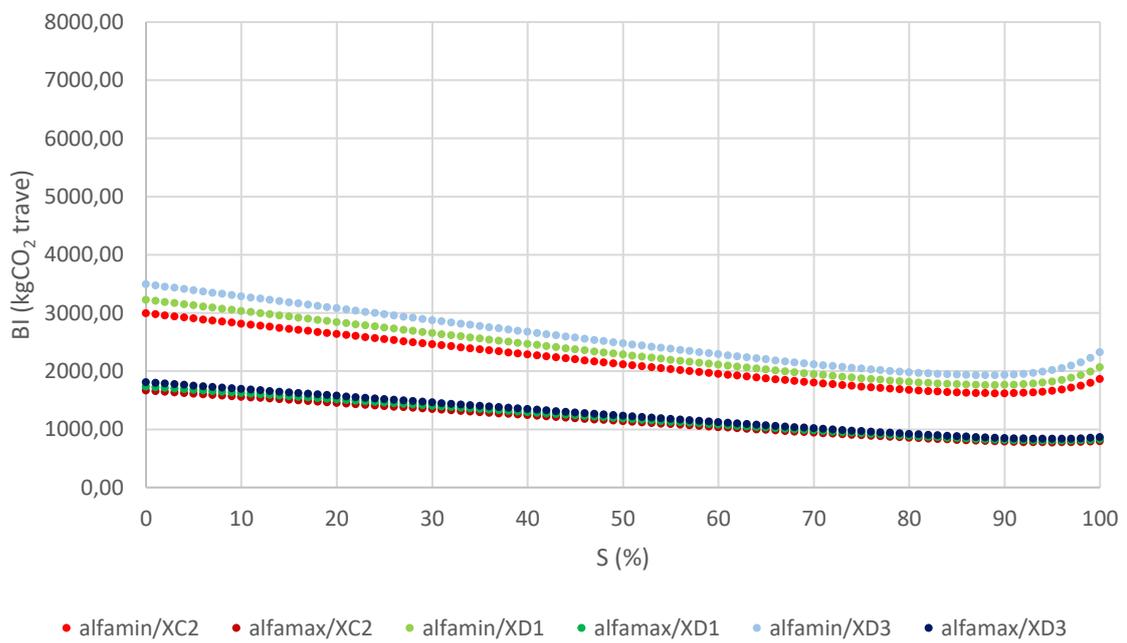
L=8 m,  $f_c=27$  MPa



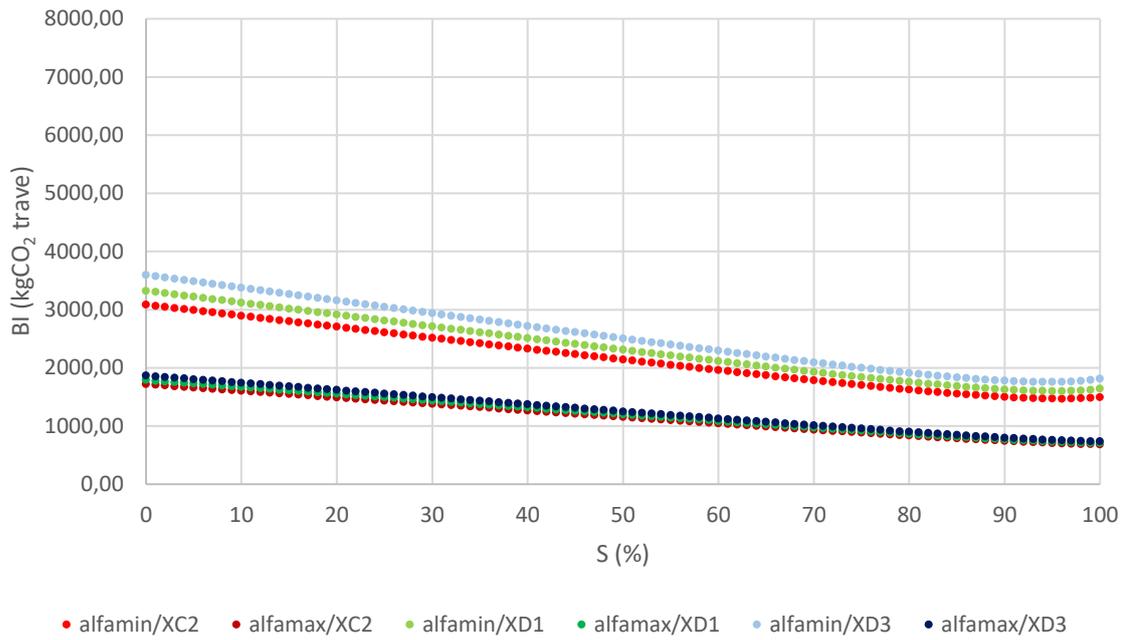
L=8 m,  $f_c=32$  MPa



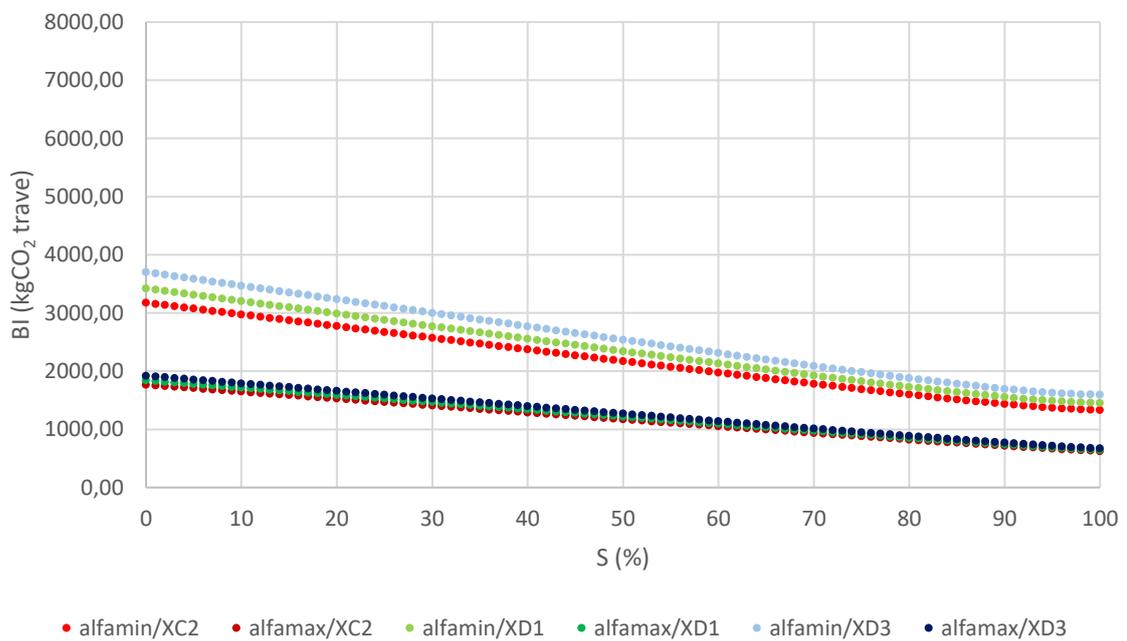
L=8 m,  $f_c=37$  MPa



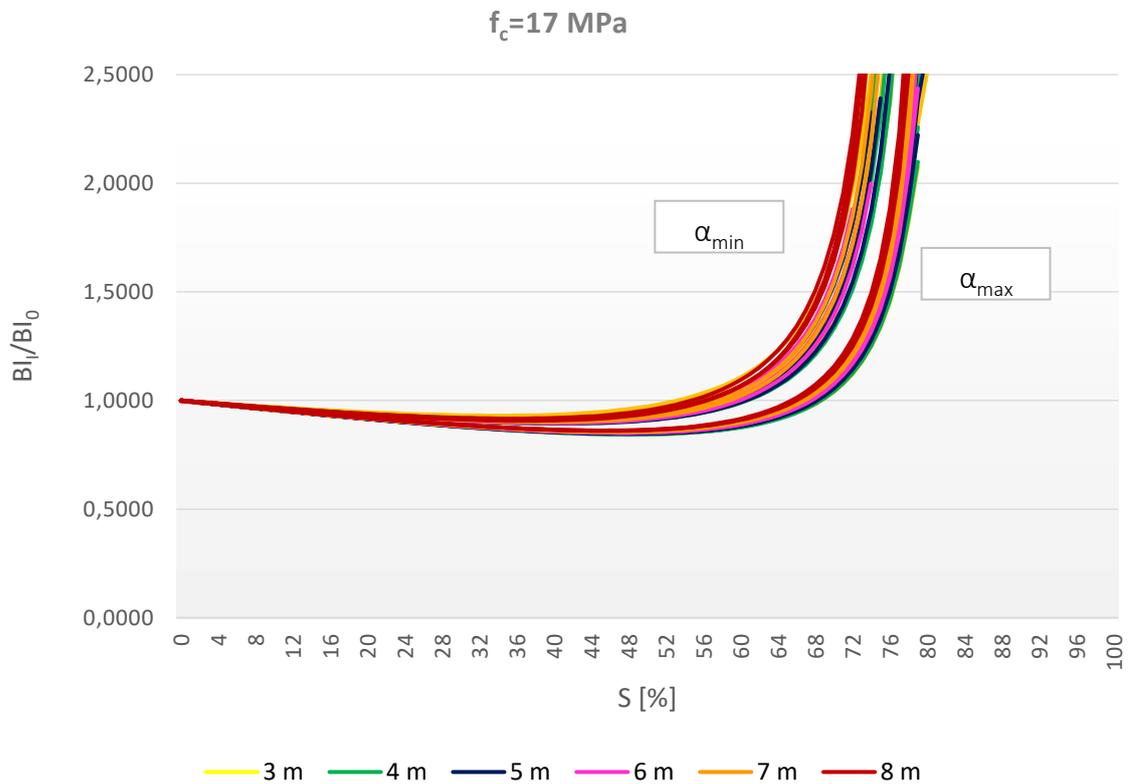
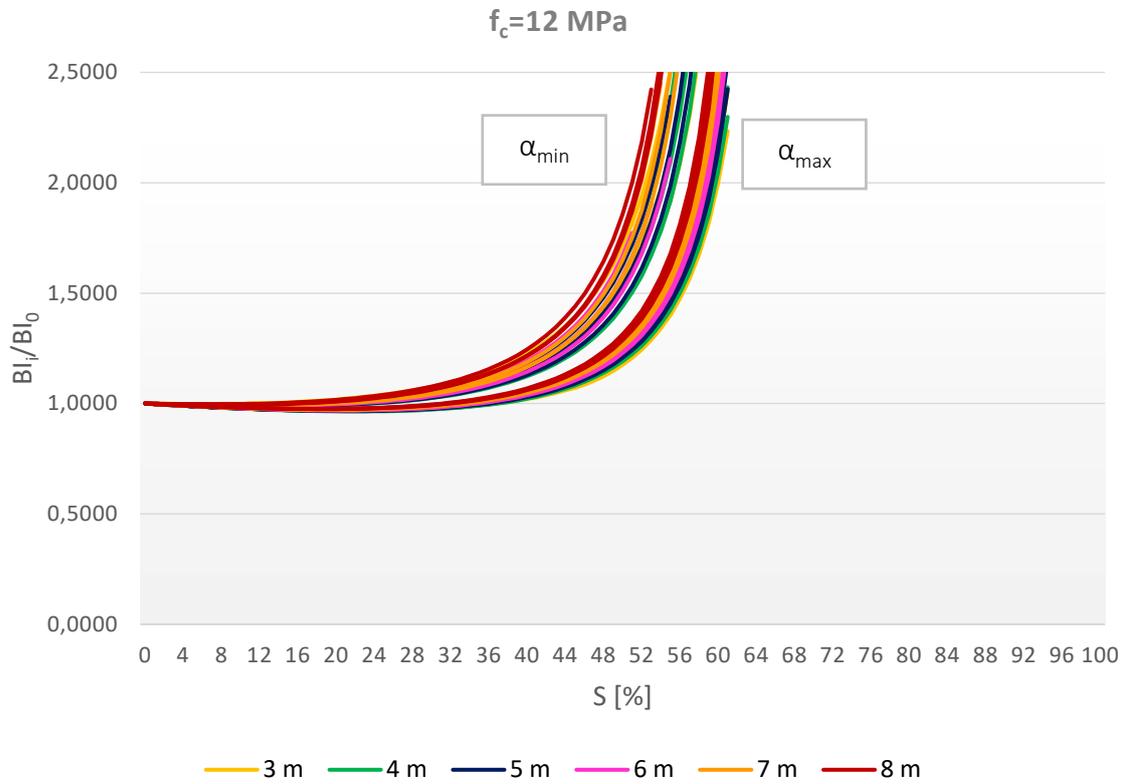
L=8 m,  $f_c=42$  MPa

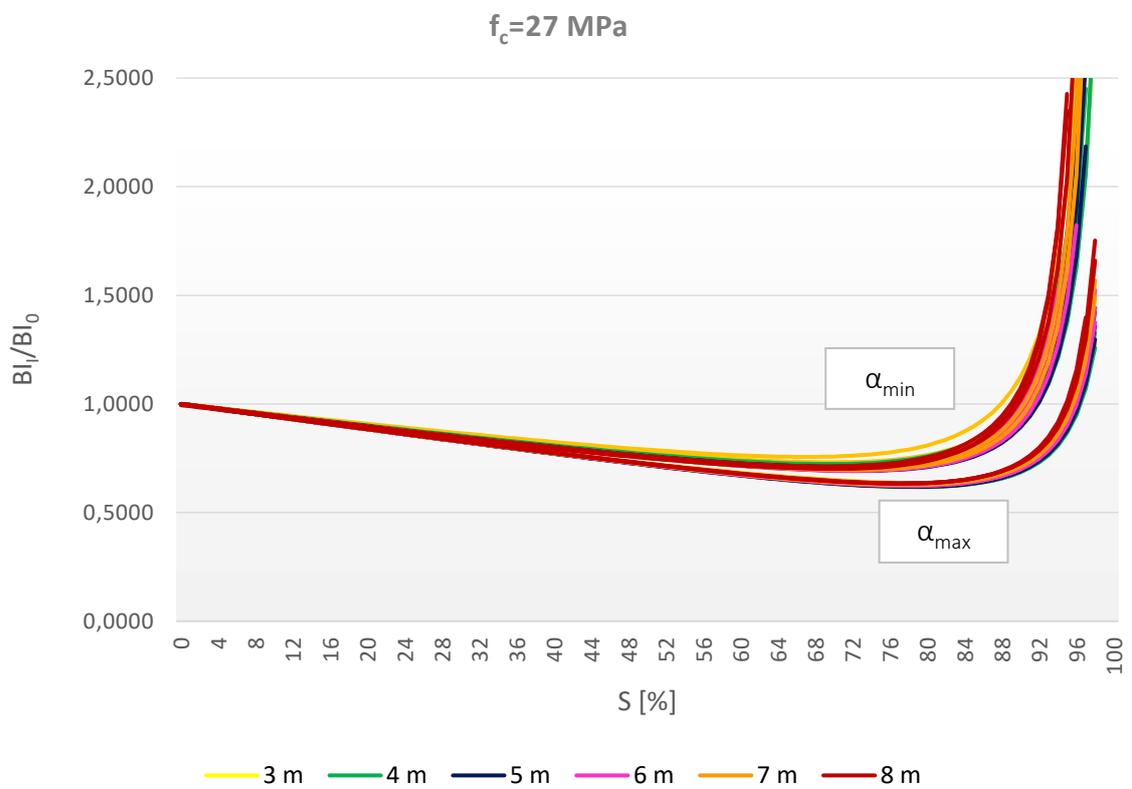
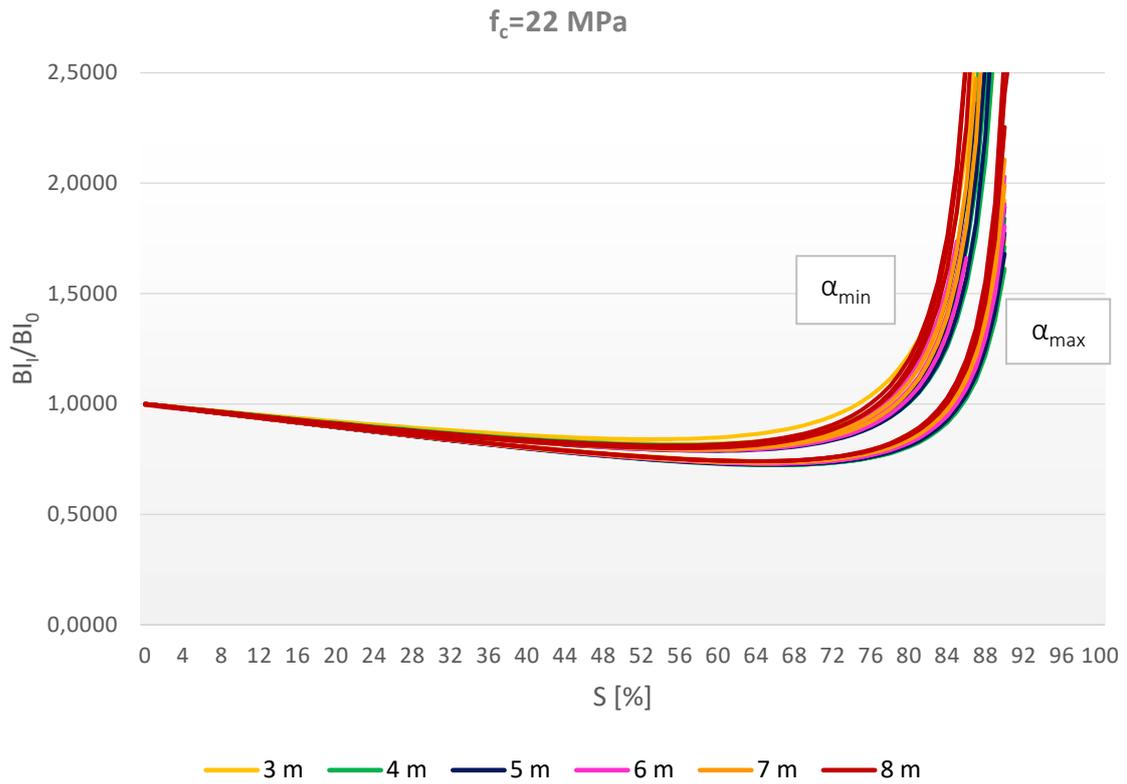


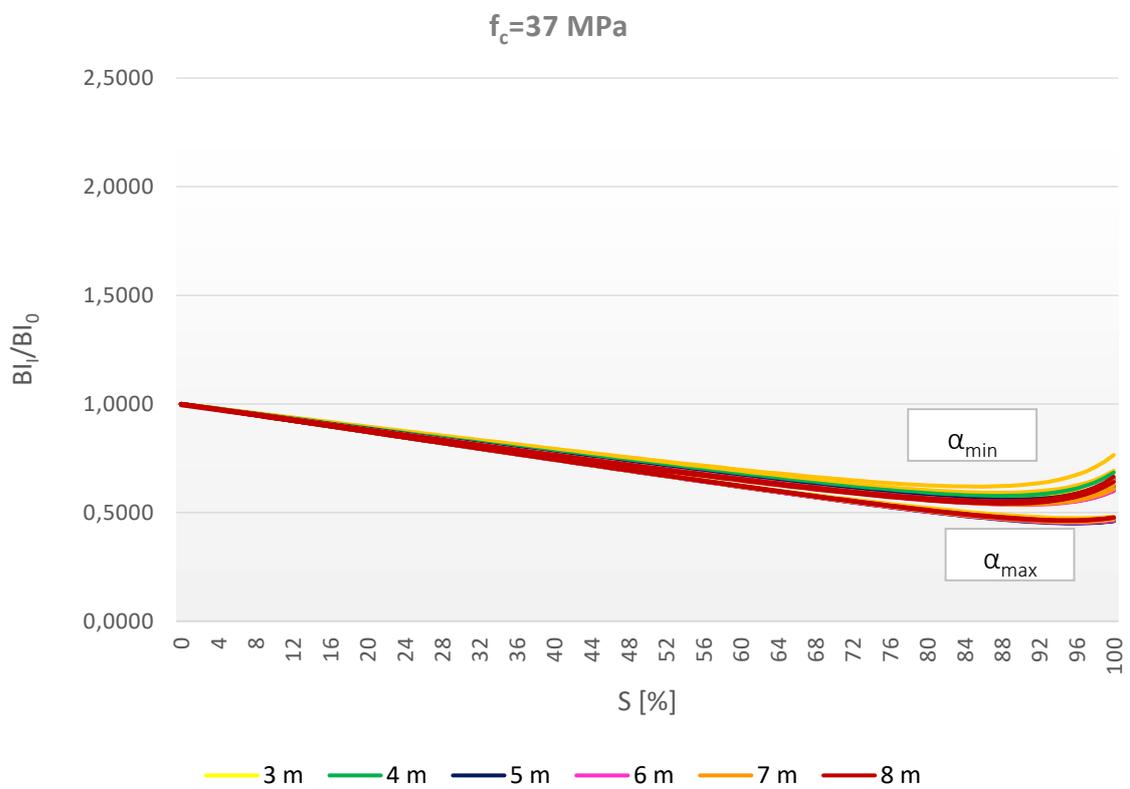
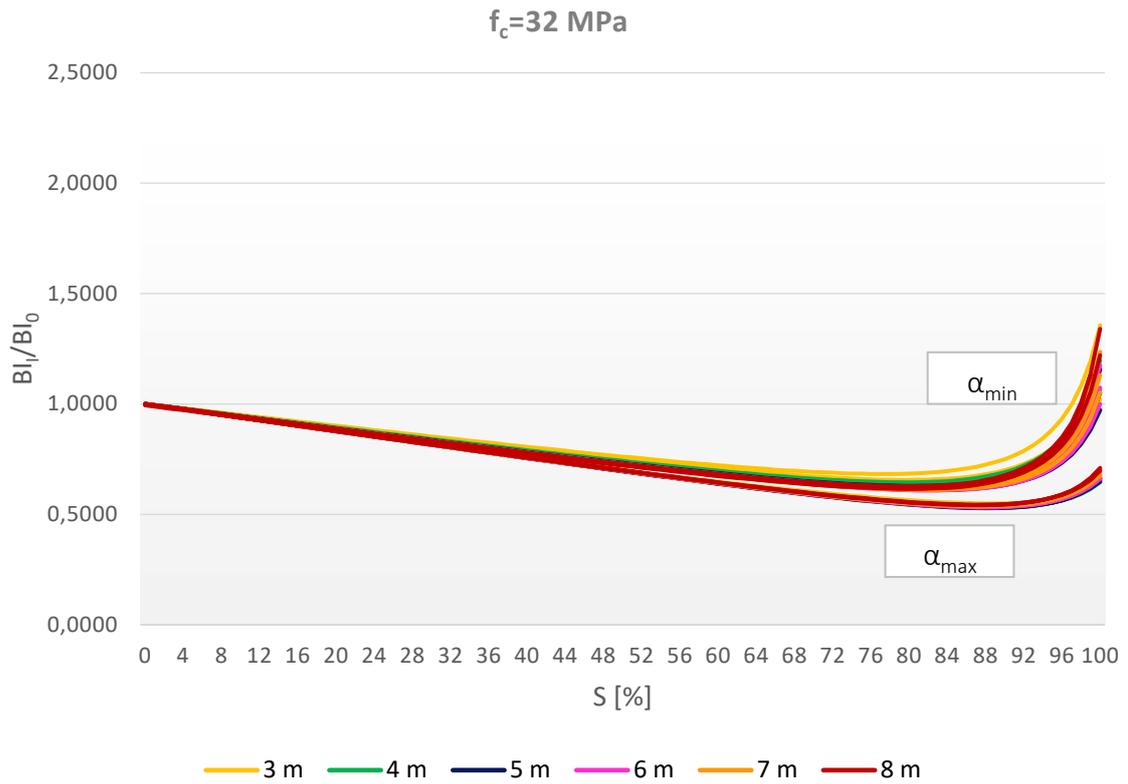
L=8 m,  $f_c=47$  MPa

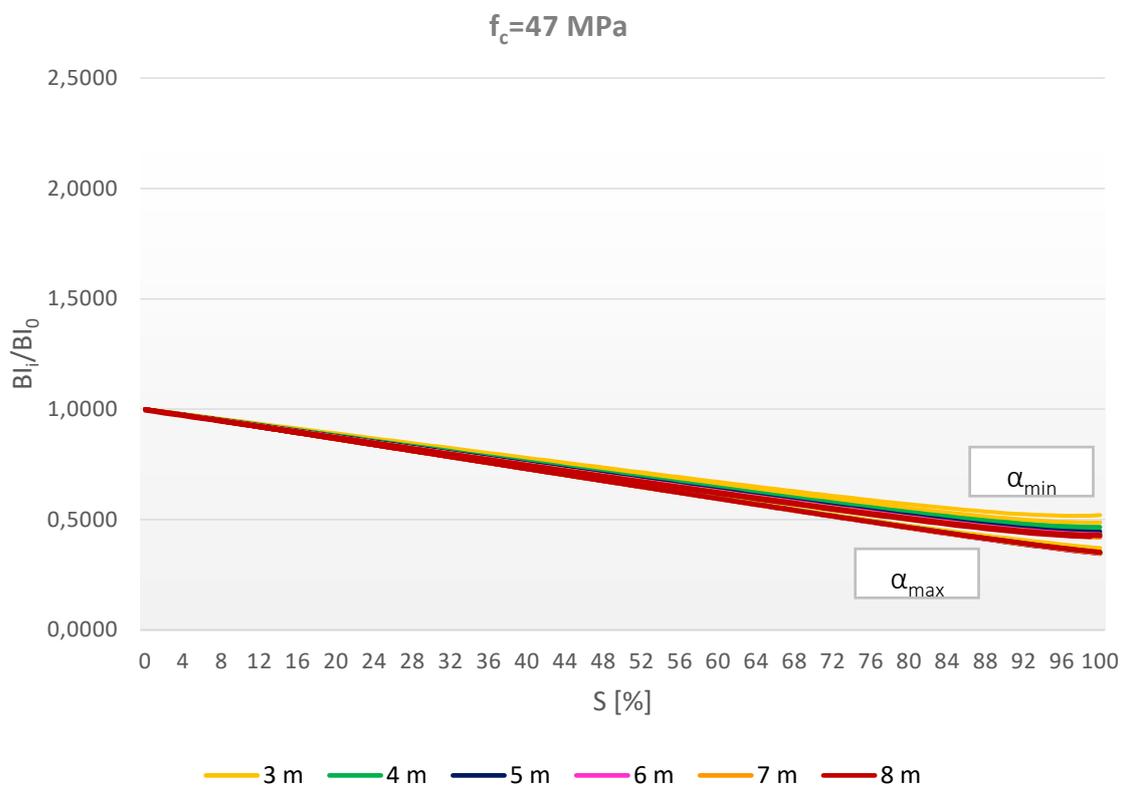
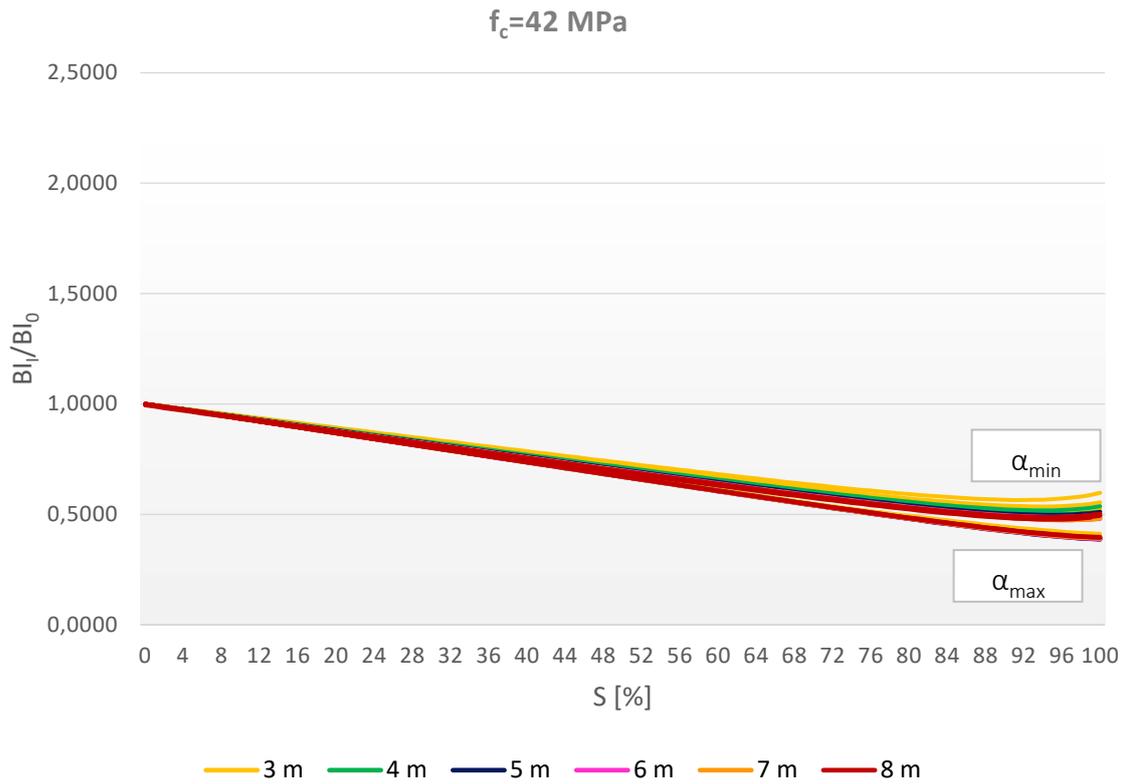


## ALLEGATO II. DIAGRAMMI bi-S

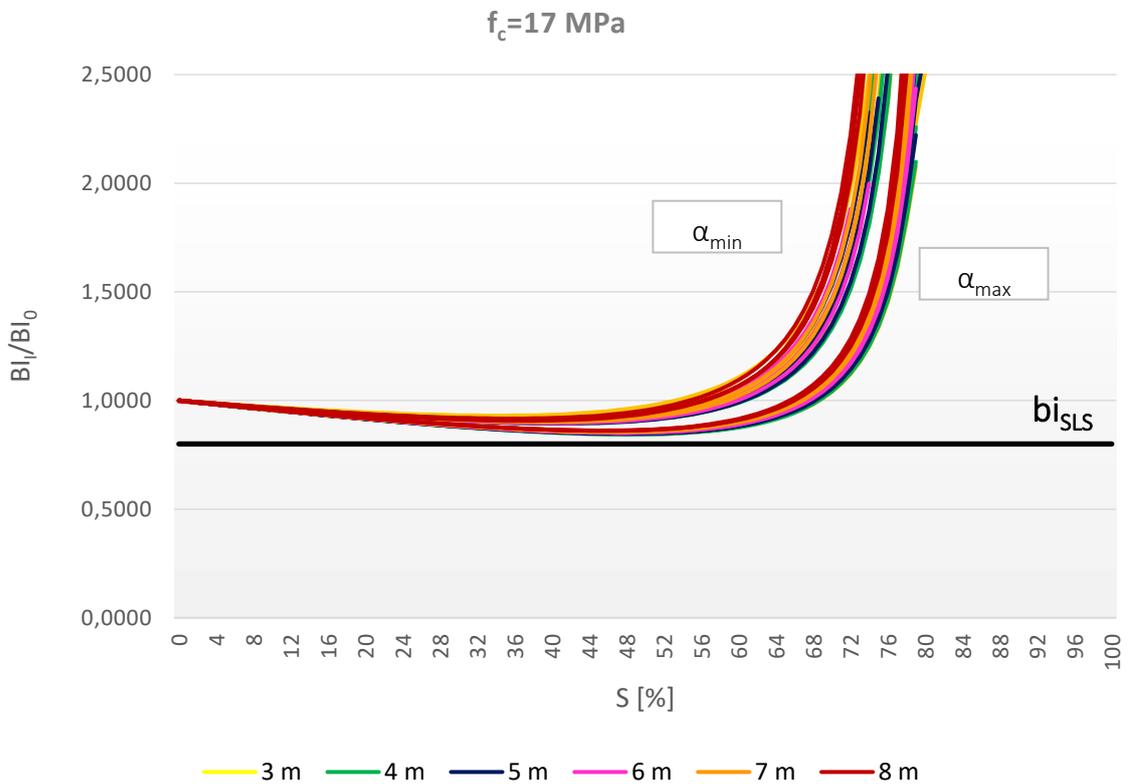
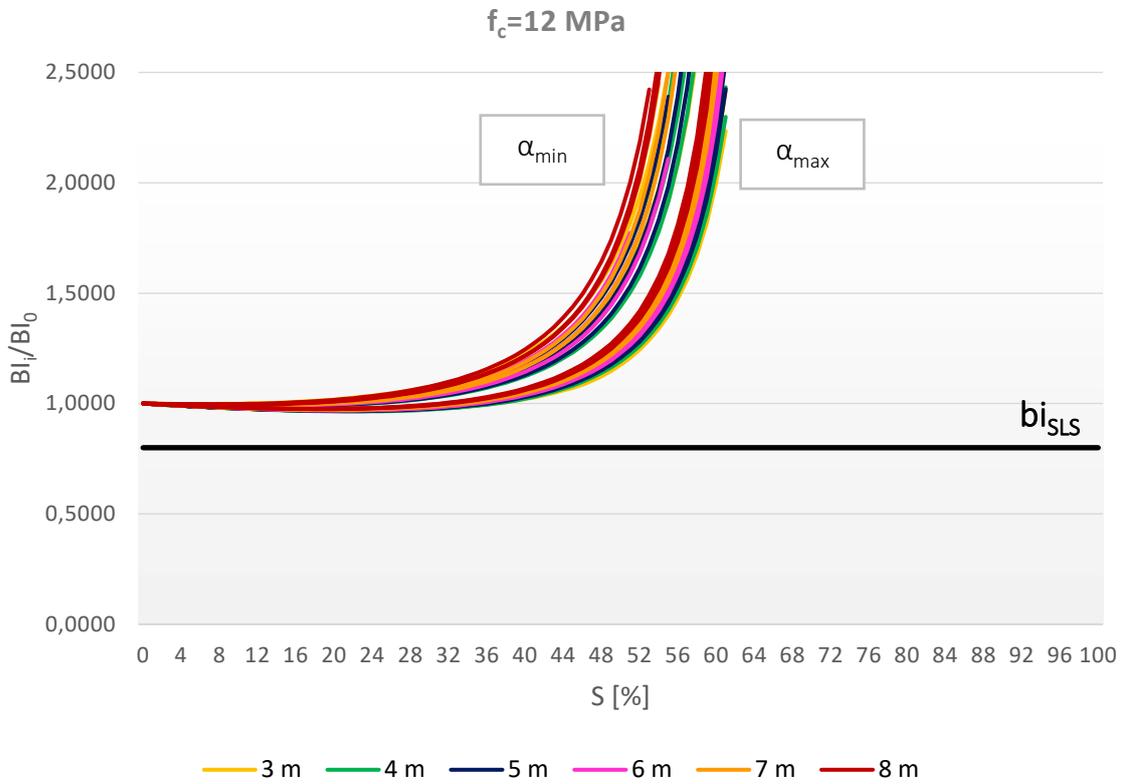


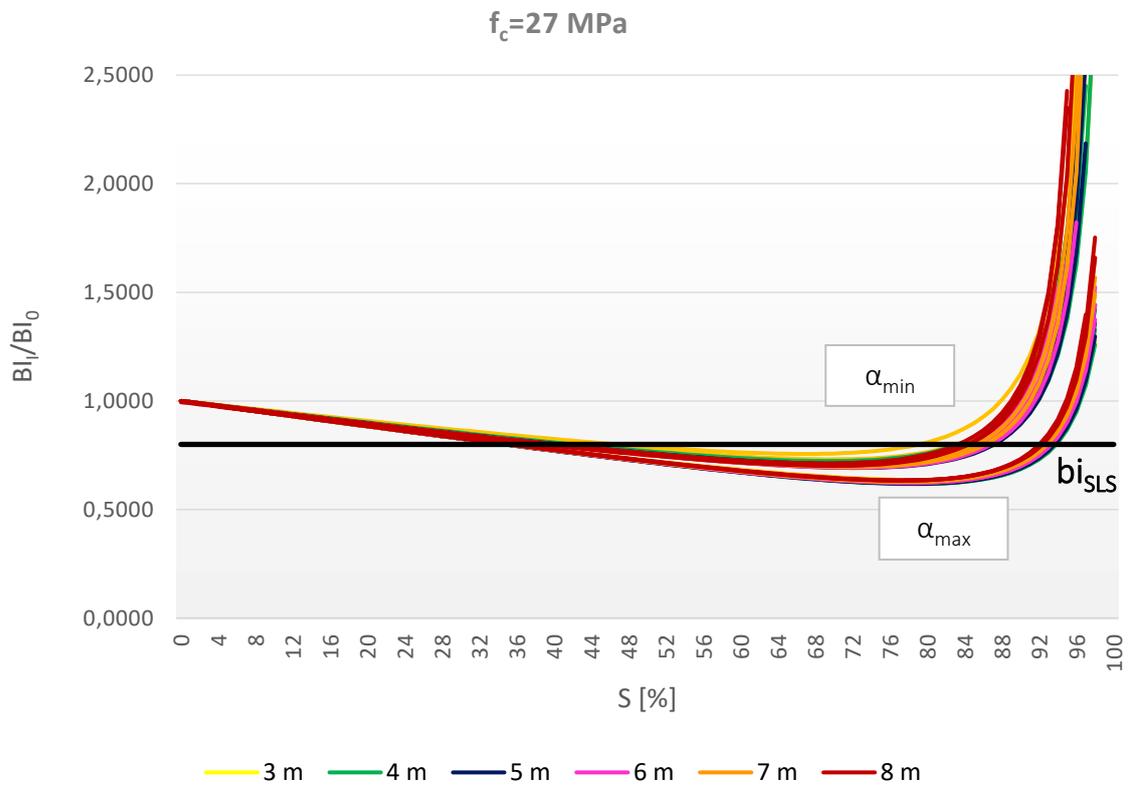
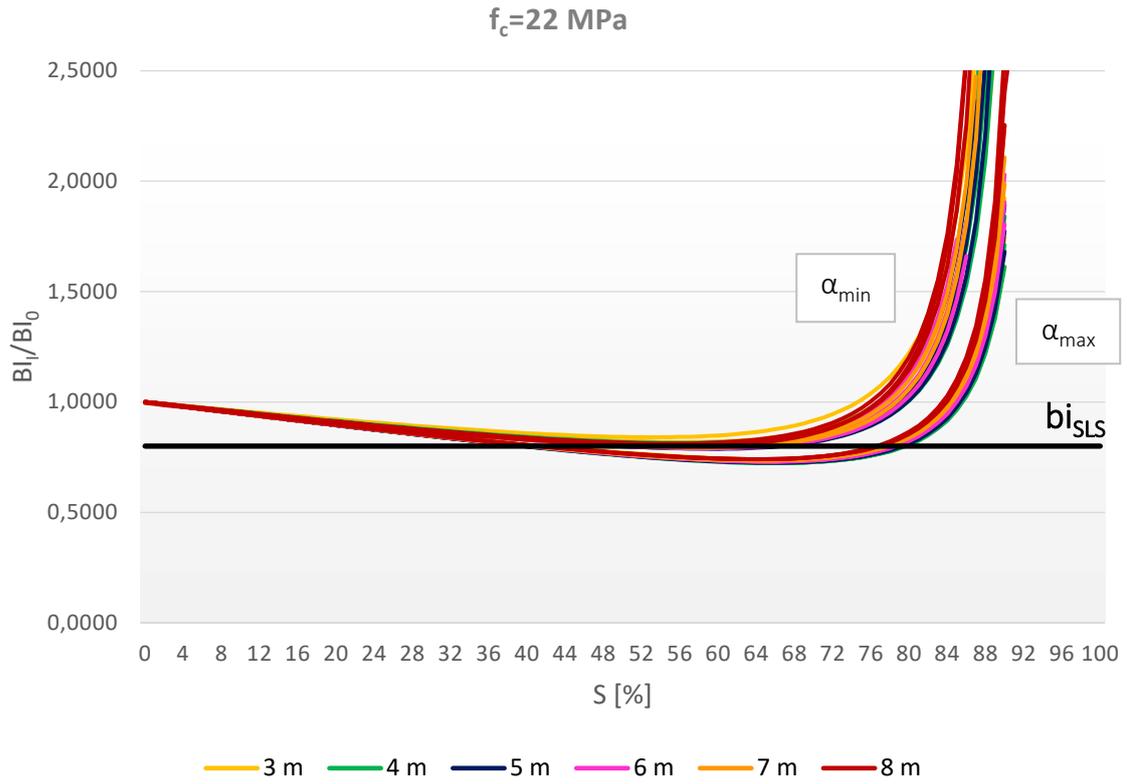


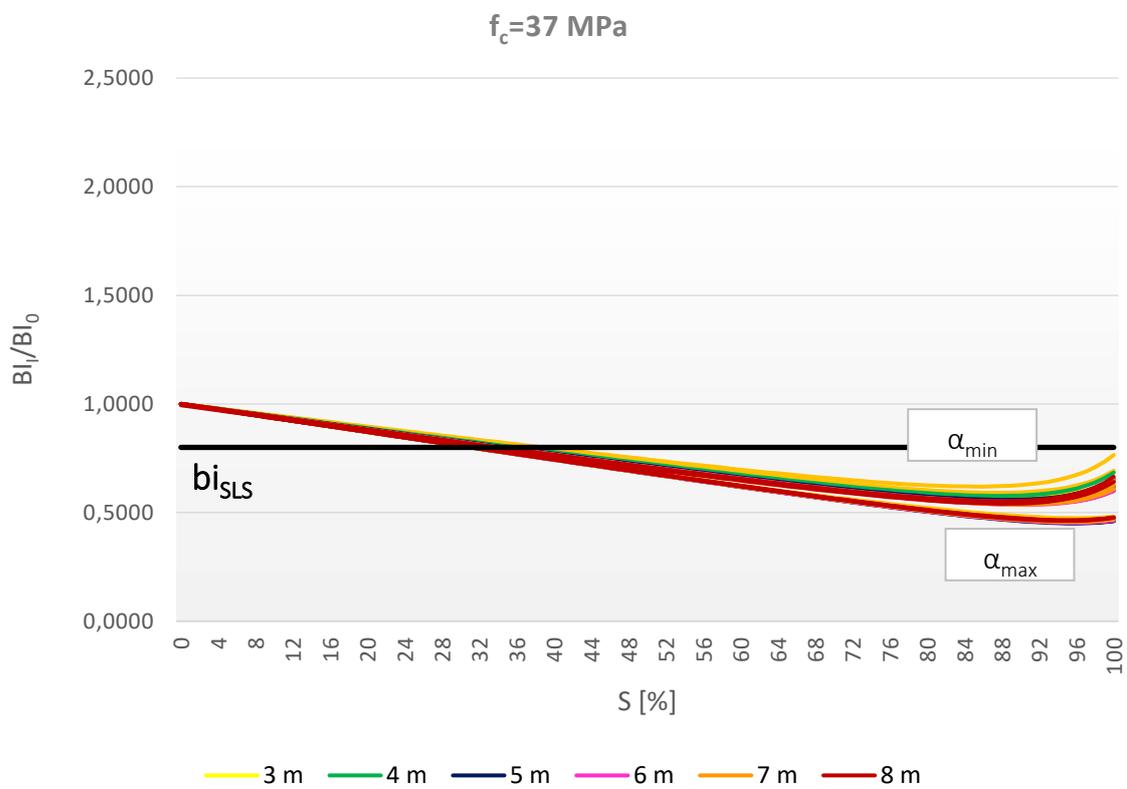
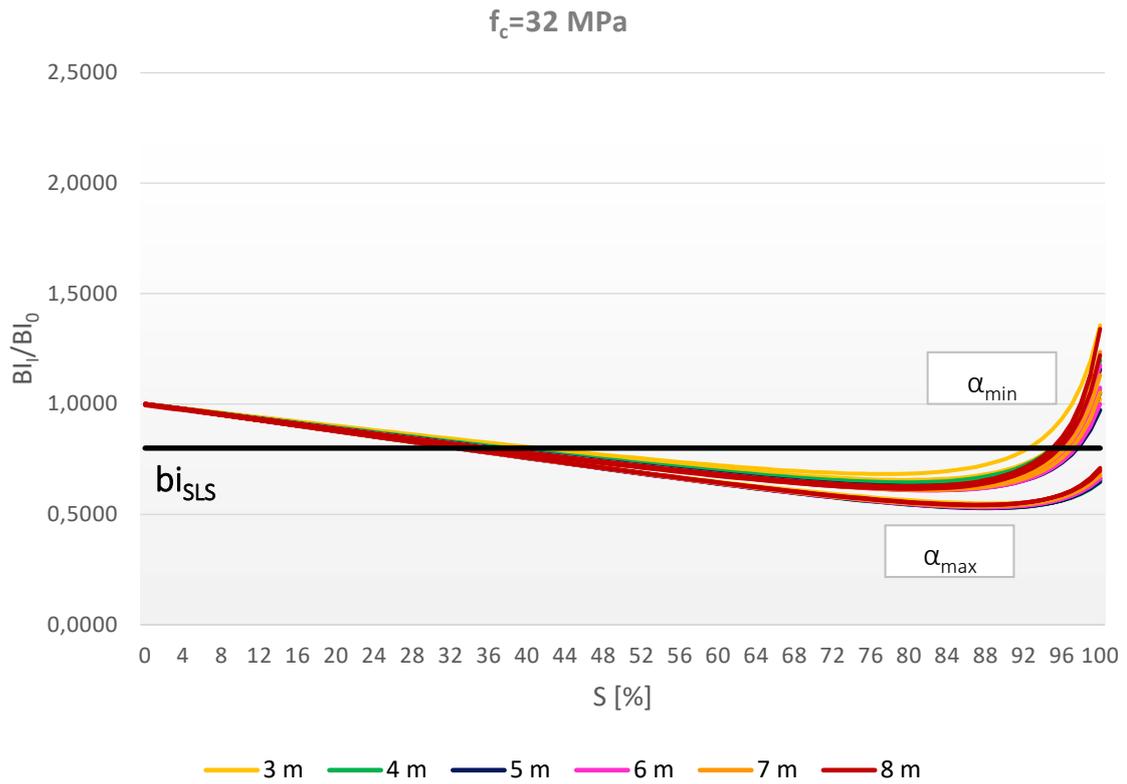


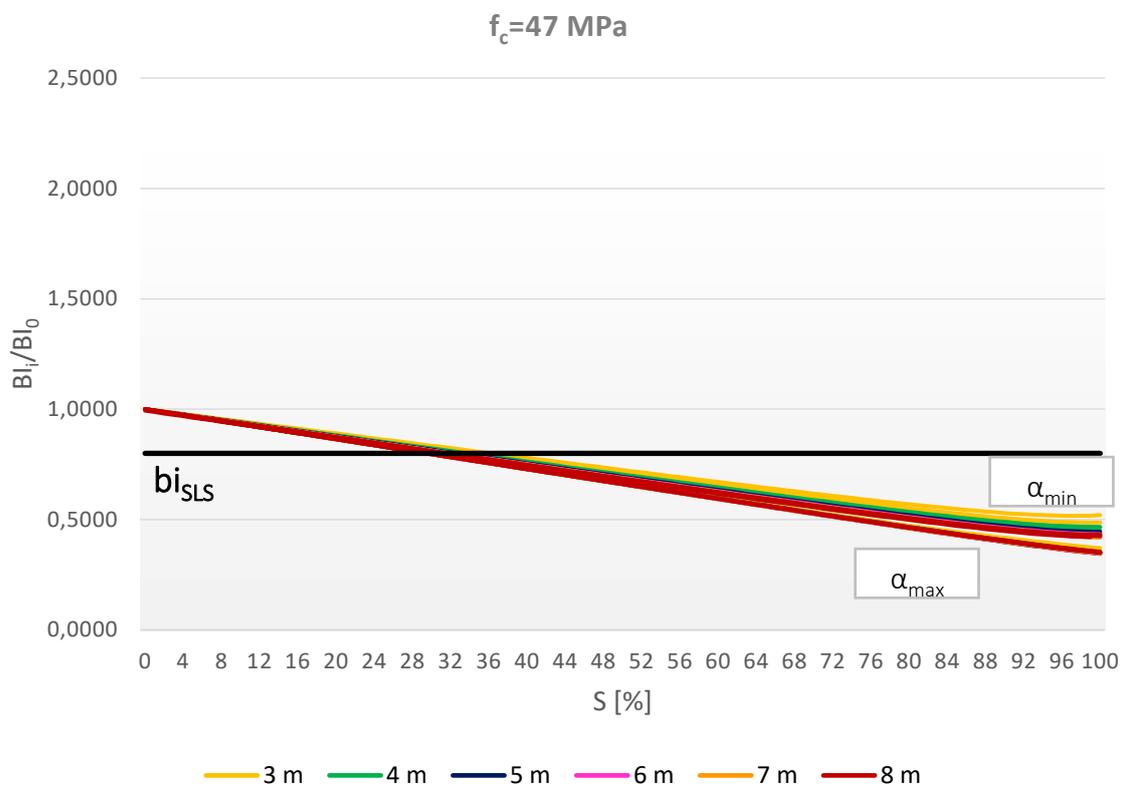
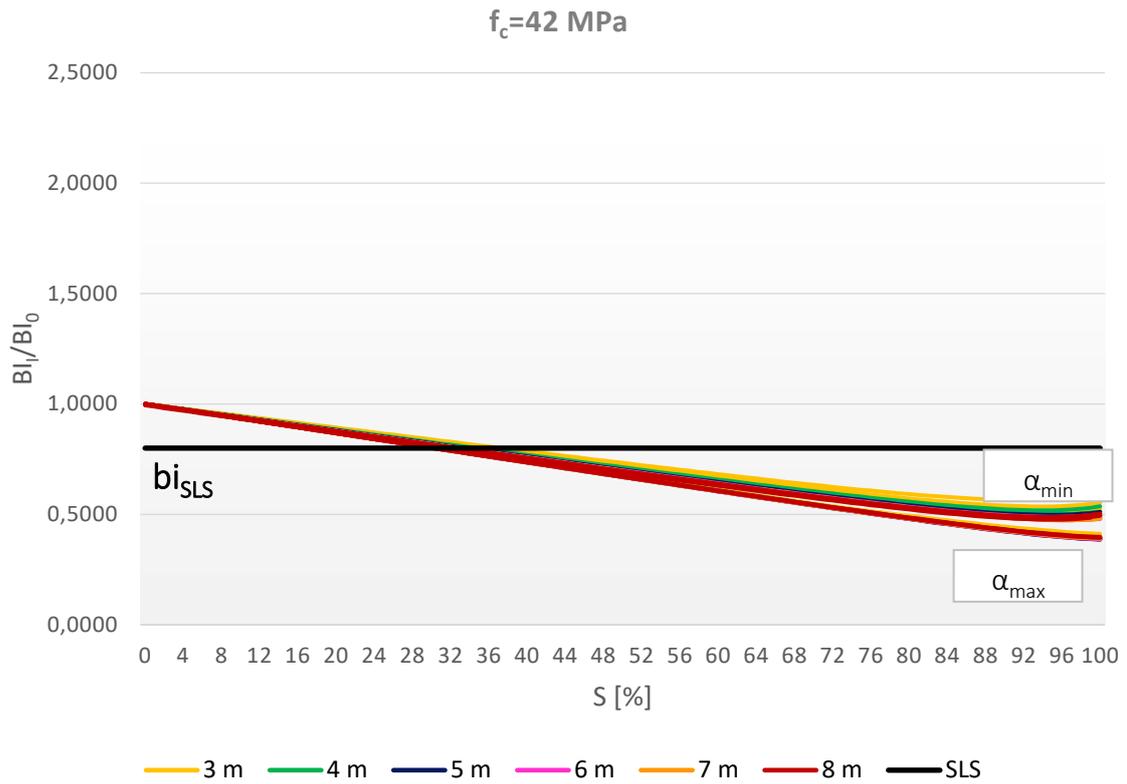


## ALLEGATO III. DIAGRAMMI bi-S-SLS









## BIBLIOGRAFIA

- 1999/519/CE, R. C. (1999). *Limitazione dell'esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz.*
- Bikeitalia.it. (s.d.). <https://www.bikeitalia.it/2017/02/08/filtro-antiparticolato-sui-motori-diesel/>.
- Bonnefous, E. (1977). *Dossier completo sull'ecologia nel mondo.* Città Nuova Editrice.
- De Larrard, F. (1999). Concrete mixture proportioning.
- De Marchi, B., Pellizzoni, L., & Ungaro, D. (2001). *Il rischio ambientale.* Il Mulino.
- EC2. (2004). EN 1992-1-1:2004 - Eurocode 2: Design of concrete structures. General rules and rules for building. CEN.
- Focus.it. (s.d.). <https://www.focus.it/tecnologia/motori/quanto-inquina-davvero-l-auto-elettrica>.
- G. Habert, N. R. (2009). Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives.
- la Repubblica.it. (s.d.).  
[http://www.repubblica.it/ambiente/2017/11/04/news/nasa\\_il\\_buco\\_dell\\_ozono\\_ai\\_minimi\\_dal\\_1988-180216750/](http://www.repubblica.it/ambiente/2017/11/04/news/nasa_il_buco_dell_ozono_ai_minimi_dal_1988-180216750/).
- la Repubblica.it. (s.d.).  
[http://www.repubblica.it/oncologia/news/2018/01/04/news/taranto\\_i\\_nuovi\\_dati\\_del\\_registro\\_tumori\\_la\\_situazione\\_rimane\\_critica\\_-185788398/](http://www.repubblica.it/oncologia/news/2018/01/04/news/taranto_i_nuovi_dati_del_registro_tumori_la_situazione_rimane_critica_-185788398/).
- Lam L., W. Y. (1998). Effect of fly ash and silica fume on compressive and fracture behaviors of concrete. 28, 271-283. Cement and Concrete Research.
- Libero.it. (s.d.). <http://digilander.libero.it/TEXAS76/4.htm>.
- NTCo8. (2008). DM 14.01.2008 - Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni. Ministero delle Infrastrutture.
- Regione Liguria. (s.d.). <http://www.ambienteinliguria.it/lirgw/eco3/ep/home.do>.
- SOGESID. (s.d.). [http://www.sogesid.it/sviluppo\\_sostenibile.html](http://www.sogesid.it/sviluppo_sostenibile.html).
- Treccani, E. (s.d.). [www.treccani.it/enciclopedia](http://www.treccani.it/enciclopedia).



## RINGRAZIAMENTI

*Desidero innanzi tutto ringraziare il Professor Ing. Alessandro P. Fantilli per i preziosi insegnamenti durante l'intero percorso di studi e per le ore dedicate alla mia tesi, risultando sempre disponibile a dirimere i miei dubbi.*

*Vorrei anche esprimere la mia più sincera gratitudine ai miei coinquilini Alessio e Antonio e ai miei amici (non colleghi) di università, in particolare Chiara, Giulia, Giuseppe, Luca, Mariagrazia, Paola e Francesco, per i numerosi momenti, le grasse risate e le altrettante abbondanti cene passate insieme durante questi anni.*

*Infine, e non per importanza, ho desiderio di ringraziare con smisurato affetto i miei genitori per il sostegno morale ed economico che mi hanno dato, i miei amici, in particolare Gianmarco, con i quali ho avuto modo di svagarmi dallo studio, e la mia fidanzata Maria per aver condiviso insieme tutte le difficoltà degli ultimi anni di università.*

*Grazie, davvero, a tutti.*