

## Politecnico di Torino

## Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

# Calcestruzzi strutturali fibrorinforzati e alleggeriti: sperimentazione e prime ipotesi applicative

**Relatori:** Prof. Giuseppe Andrea Ferro

Candidati: Alessio Vinci

**Correlatori:** PhD. Devid Falliano PhD. Luciana Restuccia

Anno accademico 2020-2021

### Sommario

Nel lavoro di tesi sono stati studiati gli effetti di diverse tipologie di fibre e diversi dosaggi sul comportamento meccanico di calcestruzzi fibrorinforzati. In particolare, sono stati studiati differenti dosaggi di fibre, precisamente pari a 2, 3 e 4 kg/m<sup>3</sup> e sono state selezionate fibre in modo tale da mettere in luce il comportamento in relazione alla diversa geometria. La presenza di bugnature sulla superficie delle fibre permette di ottenere una migliore aderenza tra fibra e calcestruzzo e, conseguentemente, migliori capacità flessionali. Un secondo campo di ricerca investigato ha riguardato la progettazione e l'investigazione meccanica di calcestruzzi schiumati a densità variabili tra 1400 e 1900 kg/m<sup>3</sup>: i risultati hanno messo in luce gli effetti del diametro massimo dell'aggregato, del rapporto aggregato cemento, del rapporto acqua cemento e del tipo di tensioattivo sulle proprietà di questo materiale nel range di densità medio-alta, evidenziando come sia possibile ottenere calcestruzzi schiumati a bassa densità da applicare per scopi strutturali in quanto le resistenze a compressione sono superiori a 25 MPa. In conclusione, si è anche valutato l'effetto dell'utilizzo di calcestruzzi alleggeriti per la realizzazione di strutture in calcestruzzo armato e si è valutato in maniera preliminare l'effetto sulla risposta sismica di una sostituzione del calcestruzzo normale con uno alleggerito di pari resistenza a compressione studiato nella parte sperimentale: si è visto che ciò comporta una riduzione delle sollecitazioni e un incremento degli spostamenti, che comunque soddisfano i requisiti normativi.

## Abstract

In the thesis work, the effects of different types and dosages of fibers on the mechanical behavior of fiber-reinforced concretes were studied. In particular, different dosages of fibers were studied, precisely equal to 2, 3 and 4 kg/m<sup>3</sup>. The presence of surface embossing on the fibers allows to obtain a better adhesion between fiber and concrete and, consequently, better flexural capacities. A second field of research investigated concerned the design and mechanical investigation of foamed concretes with densities ranging from 1400 and 1900 kg/m<sup>3</sup>: the results highlighted the effects of the maximum diameter of the aggregate, the aggregate to cement ratio, the water to cement ratio and the type of surfactant on the properties of this material in the medium-high density range, highlighting how it is possible to obtain low-density foamed concretes to be applied for structural purposes as the compressive strengths are higher than 25 MPa. In conclusion, the effect of the use of lightweight concretes for the construction of reinforced concrete structures was also evaluated; in particular, the effect on the seismic response of a normal weight reinforced concrete structure with that of a lightweight reinforced concrete structure, considering equal compressive strength values, was preliminarily evaluated: it was seen that this involves a reduction in stress and an increase in displacements, which, however, meet the regulatory requirements.

## Indice

Sommariov
Abstract vi
Introduzione1
Capitolo 1 3
1 Calcestruzzi strutturali fibrorinforzati
1.1 Analisi delle proprietà meccaniche3
1.1.1 Resistenza a compressione6
1.1.2 Resistenza a trazione8
1.1.3 Resistenza a flessione e tenacità9
1.1.4 Durabilità del calcestruzzo fibrorinforzato13
1.2 Valutazione proprietà meccaniche calcestruzzi fibrorinforzati14
1.2.1 Test di flessione su tre punti e di compressione14
1.2.2 Valori di resistenza a flessione su tre punti15
2 Il calcestruzzo schiumato 22
2.1 Caratteristiche peculiari e applicazioni del calcestruzzo schiumato22
2.1.1 Il calcestruzzo schiumato: un materiale innovativo22
2.1.1.1 Caratteristiche funzionali del calcestruzzo schiumato24
2.2 Le schiume25
2.2.1 Sistemi omogenei ed eterogenei25
2.2.2 Sistemi dispersi26
2.2.2.1 Stabilità dei sistemi dispersi26
2.2.2.2 Stabilità della schiuma33
2.2.2.3 La stabilità della schiuma nei calcestruzzi schiumati
2.3 Le proprietà del calcestruzzo schiumato sia allo stato fresco che allo stato indurito 39

2.	3.2	Le	caratteristiche meccaniche del calcestruzzo schiumato	. 44
2.	3.3	Du	rabilità del calcestruzzo schiumato	. 48
	2.3.3	3.1	Permeabilità	. 48
	2.3.3	3.2	Ambienti aggressivi	. 53
2.4	Ott	imiz	zazione della miscela di calcestruzzo schiumato per fini strutturali	. 55
2.	4.1	Pro	oprietà meccaniche	. 55
	2.4.1	l.1	Resistenza a compressione	. 55
	2.4.1	L.2	Miglioramento delle proprietà meccaniche del calcestruzzo schium	iato
tra	amite	ľag	giunta di fibre	. 63
2.5	Арр	olica	zioni del calcestruzzo schiumato	. 68
3 F	ase s	peri	imentale	70
3.1	Pro	gett	o delle miscele e caratteristiche allo stato fresco	. 70
3.	1.1	Mi	scela MIX1	. 70
3.	1.2	Mi	scela MIX2	. 74
	3.1.2	2.1	Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2	. 75
	3.1.2	2.2	Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2	. 76
3.	1.3	Mi	scela MIX2BIS	. 77
	3.1.3	3.1	Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2BIS	. 78
	3.1.3	3.2	Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2BIS	. 79
3.	1.4	Mi	scela MIX3	. 80
	3.1.4	l.1	Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX3	. 81
	3.1.4	1.2	Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX3	. 82
3.	1.5	Mi	scela MIX4	. 83
	3.1.5	5.1	Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX4	. 84
	3.1.5	5.2	Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX4	. 84
3.	1.6	Mi	scela MIX5	. 86
	3.1.6	5.1	Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX5	. 87
	3.1.6	5.2	Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX5	. 87
3.	1.7	Mi	scela MIX2ISOCEM	. 89
	3.1.7	7.1	Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2ISOC 90	CEM

3.1.7.2 Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2ISOCEM e del volume di materiale prodotto90
3.1.8 Miscela MIX2CBD91
3.1.8.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2CBD92
3.1.8.2 Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2CBD e del volume di materiale prodotto93
3.2 Valutazione delle proprietà meccaniche delle miscele di calcestruzzo schiumato allo stato indurito
3.2.1 Resistenza a flessione119
3.2.1.1 Analisi dei risultati123
3.2.2 Resistenza a compressione134
3.2.2.1 Analisi dei risultati134
3.2.3 Energia di frattura141
3.2.3.1 Analisi dei risultati141
3.2.4 Conclusioni finali e scelta della miscela146
4 Fase progettuale147
4.1 Accenni teorici di ingegneria sismica147
4.2 Valutazione del comportamento di un calcestruzzo alleggerito nella risposta simica di una struttura in cemento armato
4.2.1 Modellazione strutturale158
4.2.1.1 Strutture in calcestruzzo tradizionale159
4.2.1.2 Strutture in calcestruzzo alleggerito164
4.3 Risultati e discussioni173
Conclusioni 177
Bibliografia180

## Indice delle figure

Figura 1.1: Effetto dell'aggregato e delle fibre nel processo di fessurazione nel caso di
tensione uniassiale [2]4
Figura 1.2: Valori di resistenza a compressione su provini di calcestruzzo fibrorinforzato
al variare del rapporto di aspetto, del fumo di silice e del quantitativo di fibre [4]7
Figura 1.3: Valori della resistenza a trazione indiretta al variare del contenuto di fibre e
del contenuto del fumo di silice9
Figura 1.4: Valori di resistenza a flessione di calcestruzzi fibrorinforzati con fibre di
acciaio e con fibre di polipropilene [5]11
Figura 1.5: Valori di resistenza a flessione di calcestruzzo fibrorinforzati con fibre ibride
(acciaio e polipropilene)
Figura 1.6: Valori di resistenza a flessione di calcestruzzi fibrorinforzati al variare del
contenuto di fibre, del quantitativo di fumo di silice e del rapporto d'aspetto [4]13
Figura 1.7: Comparazione dei valori di resistenza a flessione ottenuti dai test, al variare
della tipologia e del quantitativo di fibre16
Figura 1.8: Foto dei campioni più significativi in cui si riesce ad apprezzare il percorso
fessurativo17
Figura 1.9: Curve Carico – CMOD per campioni con 2 kg/m <sup>3</sup> di fibre CH
Figura 1.10: Curve Carico – CMOD per campioni con 4 kg/m <sup>3</sup> di fibre CH
Figura 1.11: Curve Carico – CMOD per campioni con 2 kg/m <sup>3</sup> di fibre KM, monofilamento
di 54 mm
Figura 1.12: Curve Carico – CMOD per campioni con 3 kg/m <sup>3</sup> di fibre KM, monofilamento
di 54 mm
Figura 1.13: Curve Carico – CMOD per campioni con 4 kg/m³ di fibre KM, monofilamento
di 54 mm
Figura 1.14: Curve Carico – CMOD per campioni di riferimento (senza fibre)
Figura 1.15: Proprietà allo stato fresco, risultati dello slump test
Figura 2.1: Doppio strato elettrico, modello DLVO28
Figura 2.2: Andamento del potenziale elettrostatico in funzione della distanza tra due
particelle della fase dispersa
Figura 2.3: Rappresentazione del fenomeno di flocculazione impoverita
Figura 2.4: Schematizzazione bidimensionale che mostra le forze agenti su una bolla
all'interno di una miscela fresca di calcestruzzo schiumato [13]
Figura 2.5: Modifica della dimensione delle bolle quando la schiuma viene introdotta
nella miscela base [13]
Figura 2.6: Illustrazione schematica della diffusione di gas tra le bolle [13]

Figura 2.7: Influenza del quantitativo di schiuma e della densità nel flusso [15] 40 Figura 2.8: relazione tra flusso, volume di schiuma, e tipo di riempitivo [15]
Figura 2.12: proprietà di un calcestruzzo schiumato indurito in relazione alla densità [17] 47
Figura 2.13: Valori del modulo elastico a 28 giorni di miscele di calcestruzzo schiumato con differente aggregato fine [17]
Figura 2.16: Effetto della densità secca nell'assorbimento d'acqua [18]
un calcestruzzo schiumato [21]
Figura 2.21: Valori di resistenza a compressione di differenti miscele al variare del tempo di maturazione [22]
Figura 2.23: Effetto del contenuto di cenere volante nei calcestruzzi schiumati con cemento al fosfato di magnesio [23]
<ul> <li>Figura 2.26: Valori di resistenza a compressione in funzione della quantità di schiuma delle miscele di calcestruzzo schiumato con fibre di Polipropilene e senza fibre [26] 65</li> <li>Figura 2.27: Valori di resistenza a trazione in funzione della quantità di schiuma delle miscele di calcestruzzo schiumato con fibre di Polipropilene e senza fibre [26] 66</li> <li>Figura 2.28: Deformazione da ritiro per essicamento in funzione del tempo e del volume di schiuma nella miscela [26]</li></ul>
Figura 2.29: Effetto delle fibre di polipropilene nel ritiro per essiccamento dei calcestruzzi schiumati [26]

Figura 3.1: Valutazione dello slump nella miscela MIX2	77
Figura 3.2: Valutazione dello slump nella miscela MIX2BIS	79
Figura 3.3: Valutazione dello slump nella miscela MIX3	82
Figura 3.4: Valutazione dello slump nella miscela MIX4	85
Figura 3.5: Valutazione dello slump nella miscela MIX5	88
Figura 3.6: Valutazione dello slump nella miscela MIX2ISOCEM	91
Figura 3.7: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD	93
Figura 3.8: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD_DMAX025	96
Figura 3.9: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD_DMAX05	99
Figura 3.10: Consistenza della miscela MIX2CBD025_OTT+T subito dopo la miscelazi	ione
	101
Figura 3.11: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD025_OTT+T	103
Figura 3.12: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD025_OTT	106
Figura 3.13: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CDB025_O_A/C0,5	109
Figura 3.14: Valutazione dello slump nella miscela M2CBD05_O2	113
Figura 3.15: Valutazione dello slump nella miscela M2CBD025_1,8_OTT+T	116
Figura 3.16: Valutazione dello slump nella miscela M2CBD025_1,5_OTT+T	118
Figura 3.17: Realizzazione dell'intaglio nei provini mediante sega circolare	120
Figura 3.18: Requisiti geometrici, per la realizzazione dei provini da testare, previsti c	lalla
normativa JCI-S-001-2003 [27]	120
Figura 3.19: Macchina per prova di flessione su tre punti	121
Figura 3.20: Curva Carico – CMOD del primo provino della miscela MIX2CBD_DMAX	025
	122
Figura 3.21: Valori di resistenza a flessione al variare della densità in aria	129
Figura 3.22: Valori di resistenza a flessione al variare della densità secca	129
Figura 3.23: Valori di resistenza a flessione media al variare della densità target	131
Figura 3.24: Macchina utilizzata per i test di compressione	134
Figura 3.25: Valori di resistenza a compressione al variare della densità in aria	136
Figura 3.26: Valori di resistenza a compressione al variare della densità secca	136
Figura 3.27: Valori di resistenza a compressione media al variare della densità ta	rget
	138
Figura 3.28: Valori dell'energia di frattura al variare della densità in aria	143
Figura 3.29: Valori dell'energia di frattura al variare della densità secca	143
Figura 3.30: Valori dell'energia di frattura media al variare della densità target	144
Figura 4.1: Sistema ad un grado di libertà [30]	147
Figura 4.2: Diagramma di amplificazione dello spostamento di un oscillatore semp	olice
soggetto ad una forzante armonica [30]	150
Figura 4.3: Spettro di risposta elastico in termini di pseudo-accelerazione [30]	152
Figura 4.6: Spettro di risposta elastico relativo al sito dove sono ubicate le strutture, r	nella
città di Massina	158

Figura 4.7: Parametri di pericolosità sismica relativi al sito dove sono ubicate le strutture,
nella città di Messina 159
Figura 4.8: Valore del taglio Tx relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo schiumato
Figura 4.9: Valore del taglio Ty relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo schiumato
Figura 4.10: Valore del momento Mx relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo
schiumato
Figura 4.11: Valore del momento My relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo
schiumato
Figura 4.16: Istogramma con i valori dei periodi delle strutture al variare dei numeri di
piani e del materiale utilizzato 173
Figura 4.17: Valori del taglio Tx al variare del numero di piani e della tipologia di
calcestruzzo
Figura 4.18: Valori del taglio Tx al variare del numero di piani e della tipologia di
calcestruzzo
Figura 4.19: Valori degli spostamenti massimi al variare del numero di piani e della
tipologia di calcestruzzo
Figura 4.20: Valori degli spostamenti massimi relativi alla combinazione sismica, al
variare del numero di piani e della tipologia di calcestruzzo

## Indice delle tabelle

Tabella 1.1: Risultati dei test di compressione su provini in calcestruzzo tradizionale e in calcestruzzo fibrorinforzato [3]
Tabella 1.2: Risultati di resistenza a trazione indiretta al variare del contenuto di fibre [3] 8
Tabella 1.3: Valori di resistenza a flessione sui provini di calcestruzzo fibrorinforzato al variare della tipologia e del quantitativo di fibre
Tabella 3.1: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX171
Tabella 3.2: Ingredienti e grammature di ogni singolo componente della miscela MIX1         71
Tabella 3.3: Valori calcolati della densità allo stato fresco relativi alla miscela MIX1 73
Tabella 3.4: Valori dello slump e del flow ottenuti per la miscela MIX1
Tabella 3.5: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX275
Tabella 3.6: Ingredienti e grammature di ogni singolo componente della miscela MIX2         75
Tabella 3.7: Valori calcolati della densità allo stato fresco relativi alla miscela MIX2 75
Tabella 3.8: Valori dello slump e del flow ottenuti per la miscela MIX2
Tabella 3.9: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2BIS
Tabella 3.10: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela
Tabella 3.11: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2BIS
Tabella 3.12: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2BIS
Tabella 3.13: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX3.80
Tabella 3.14: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela
MIX3
Tabella 3.15: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX3.81
Tabella 3.16: Valori dello slump e del flow della miscela MIX3
Tabella 3.17: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX4.83
Tabella 3.18: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela
MIX4
Tabella 3.19: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX4 . 84
Tabella 3.20: Valori dello slump e del flow della miscela MIX4
Tabella 3.21: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX5.86

Tabella 3.22: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.23: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX5.87 Tabella 3.25: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.26: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.27: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.29: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2CBD Tabella 3.30: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.31: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2CBD Tabella 3.33: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.34: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.35: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.36: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2COBOD DMAX025...... 96 Tabella 3.37: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.38: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.39: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.41: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.42: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.43: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2CBD025 OTT+T ...... 102 Tabella 3.44: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2CBD025 OTT+T...... 103 Tabella 3.45: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2CBD025\_OTT......104

Tabella 3.46: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.47: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.48: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2CBD025 OTT ...... 106 Tabella 3.49: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.50: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.51: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.52: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2CDB025 O A/C0,5..... 109 Tabella 3.53: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.54: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.55: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.56: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela M2CBD05\_02.....111 Tabella 3.57: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.58: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.59: Valori dello slump e del flow della miscela M2CBD05 02 ...... 113 Tabella 3.60: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.61: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.62: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.63: Valori dello slump e del flow della miscela M2CBD025\_1,8\_OTT+T ..... 116 Tabella 3.64: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela Tabella 3.65: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela Tabella 3.66: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela Tabella 3.67: Valori dello slump e del flow della miscela M2CBD025 1,5 OTT+T ..... 119 Tabella 3.68: Valori di resistenza a flessione di tutte le miscele di calcestruzzo schiumato realizzate durante la fase sperimentale ......123

Tabella 3.69: Tabella riassuntiva di tutti i valori delle proprietà meccaniche calcolati per
ogni singola miscela con le relative densità target125
Tabella 3.70: Valori di resistenza a compressione di tutte le miscele di calcestruzzo
schiumato realizzate durante la fase sperimentale135
Tabella 3.71: Valori dell'energia di frattura di tutte le miscele di calcestruzzo schiumato
realizzate durante la fase sperimentale142
Tabella 4.1: Proprietà meccaniche calcestruzzo tradizionale
Tabella 4.2: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura nelle strutture in calcestruzzo
tradizionale
Tabella 4.3: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura dei primi cinque piani relative
al modello a nove piani della struttura in calcestruzzo tradizionale
Tabella 4.4: Analisi dei carichi delle pareti divisorie interne relative strutture in
calcestruzzo tradizionale
Tabella 4.5: Analisi dei carichi del solaio in latero-cemento nelle strutture in calcestruzzo
tradizionale
Tabella 4.7: Carico neve calcolato nella città di Messina162
Tabella 4.8: Proprietà meccaniche relative al calcestruzzo schiumato
Tabella 4.9: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura nelle strutture in calcestruzzo
schiumato 165
Tabella 4.10: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura dei primi cinque piani relative
al modello a nove piani della struttura in calcestruzzo schiumato165
Tabella 4.11: Analisi dei carichi delle pareti divisorie interne alleggerite relative alle
strutture in calcestruzzo schiumato 166
Tabella 4.12: Analisi dei carichi del solaio alleggerito nelle strutture in calcestruzzo
schiumato 167
schuhato

### Introduzione

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di realizzare un calcestruzzo che combinasse i punti di forza di un calcestruzzo alleggerito, ossia le basse densità, con le adeguate proprietà meccaniche, necessarie per un utilizzo in ambito strutturale. Si è scelto quindi di focalizzare l'attenzione su un calcestruzzo alleggerito di tipo cellulare, precisamente un calcestruzzo schiumato, caratterizzato, tuttavia, da densità leggermente superiori (comunque significativamente inferiori ai calcestruzzi ordinari) rispetto a quelle usualmente utilizzate nelle applicazioni di questo materiale, tipicamente impiegato per scopi non strutturali al fine di sfruttarne le proprietà di isolamento termico, resistenza al fuoco e assorbimento acustico.

Per poter raggiungere tale traguardo, si è inizialmente studiata l'influenza sulla lavorabilità e sulle proprietà meccaniche (resistenza a compressione e capacità flessionali) dei vari componenti che caratterizzano una tipica miscela di calcestruzzo schiumato: cemento, sabbia, acqua e schiuma, al fine di ottenere una miscela che avesse delle caratteristiche tali da renderla una buona base di partenza per la successiva fase di miglioramento e di ottimizzazione, che caratterizzano la parte centrale del lavoro sperimentale di ricerca. Il costituente principale del materiale è la schiuma che permette di ottenere un calcestruzzo con un sistema di vuoti al suo interno, a cui si devono le caratteristiche peculiari di leggerezza, lavorabilità, isolamento termico, isolamento acustico e resistenza al fuoco.

Ottenuta la miscela iniziale, il lavoro di ricerca si è focalizzato sull'ottimizzazione del mix design, studiando, inizialmente, l'influenza, al variare del quantitativo introdotto, dei componenti principali e degli additivi utilizzati, al fine di incrementarne le prestazioni meccaniche e, allo stesso tempo, garantirne un'adeguata consistenza.

Infine, ottimizzata la miscela, vengono messi in evidenza i vantaggi che si hanno nell'utilizzare questo materiale per la realizzazione di una struttura in calcestruzzo armato, confrontandone il comportamento con quello di una struttura realizzata con un calcestruzzo ordinario di pari resistenza.

Nel Capitolo 1, viene riportato uno studio sperimentale, condotto in parallelo a quello appena accennato, riguardante l'incremento delle proprietà meccaniche, precisamente le capacità flessionali, di un calcestruzzo ordinario mediante l'aggiunta di fibre polimeriche. Si è scelto di condurre tale studio su un calcestruzzo ordinario, in quanto presenta delle caratteristiche meccaniche già ben consolidate; l'obiettivo è quello di individuare la migliore tipologia di fibre polimeriche da poter utilizzare, in futuri lavori di ricerca, per incrementare ulteriormente le prestazioni della migliore tra le miscele di calcestruzzo schiumato studiate nel presente lavoro di ricerca senza alterarne la densità.

Nel Capitolo 2, vengono presentate le principali caratteristiche del calcestruzzo schiumato, concentrandosi maggiormente sulle proprietà della miscela allo stato fresco e allo stato indurito e proseguendo con i risultati ottenuti dai primi studi presenti in letteratura, relativi ad un eventuale utilizzo di tale tipologia di calcestruzzo in ambito strutturale. Nel Capitolo 3 viene successivamente affrontata la parte di ricerca relativa allo studio dei parametri costituenti il calcestruzzo schiumato, studiandone l'influenza in funzione della differente tipologia e del differente quantitativo, per poi passare, raggiunte le prestazioni prefissate, all'ottimizzazione della miscela in termini di stabilità e proprietà meccaniche. Nel Capitolo 4, infine, si è affrontato lo studio del comportamento sismico di strutture in calcestruzzo armato, caratterizzate da un differente numero di piani, situate in una zona ad elevata pericolosità sismica.

Precisamente, si è ipotizzato di realizzare tali strutture sia utilizzando un calcestruzzo schiumato, nello specifico, quello studiato nella fase sperimentale che ha raggiunto le migliori prestazioni, sia utilizzando un calcestruzzo ordinario; questo ha permesso di evidenziare il differente comportamento sismico delle strutture apportato dalle due differenti tipologie di calcestruzzo.

## **Capitolo 1**

## 1 Calcestruzzi strutturali fibrorinforzati

### Introduzione

#### 1.1 Analisi delle proprietà meccaniche

La categoria dei calcestruzzi fibrorinforzati rappresenta una particolare tipologia di calcestruzzi che si contraddistingue dai calcestruzzi tradizionali per l'introduzione, all'interno della matrice di calcestruzzo, di elementi fibrosi, al fine di migliorarne le prestazioni della matrice stessa. Per realizzare un calcestruzzo fibrorinforzato possono essere utilizzate varie tipologie di fibre e, in funzione della natura e della geometria delle fibre utilizzate, si otterrà un differente comportamento del materiale.

Il calcestruzzo è un materiale composito, costituito da una pasta cementizia (acqua e cemento) alla quale viene aggiunto l'inerte, sia fine (sabbia) che grossolano (ghiaia). Il calcestruzzo è caratterizzato dall'avere bassi valori di resistenza a trazione, quasi dieci volte inferiori rispetto ai valori di resistenza a compressione ed inoltre, presenta un comportamento fragile, presentando quindi una caduta repentina della resistenza, fino al collasso, una volta superato il carico di picco. Il calcestruzzo è un materiale che tende a fessurarsi nel tempo, sia per effetto dei carichi esterni ad esso applicati, sia per effetti indipendenti dal carico, ad esempio, deformazioni da ritiro. Una volta fessurato, il calcestruzzo non è più in grado, in corrispondenza delle sezioni fessurate, di resistere alle sollecitazioni interne dovute all'effetto dei carichi; per tale motivo vengono introdotte delle armature in acciaio all'interno del calcestruzzo (cemento armato) che consentono di apportare una sorta di effetto cucitura tra i lembi delle fessure nel calcestruzzo, contrastando quindi l'espansione delle fessure e consentendo il trasferimento delle sollecitazioni da un lembo all'altro.

La presenza di fessure nel calcestruzzo potrebbe comprometterne la durabilità, in quanto la loro presenza potrebbe favorire la diffusione degli agenti potenzialmente aggressivi presenti nell'ambiente esterno verso l'interno degli elementi strutturali, compromettendone nel tempo le proprietà meccaniche.

L'introduzione delle fibre rappresenta una soluzione aggiuntiva, ancora non tanto diffusa, a quella delle armature, per contrastare il fenomeno fessurativo che si instaura nel calcestruzzo. La presenza di fibre nel calcestruzzo, infatti, come anche quella delle armature, non impedisce la formazione delle fessure ma ne ritarda la propagazione.

La presenza delle fibre nel calcestruzzo apporta sicuramente degli effetti positivi, tra cui il miglioramento delle proprietà meccaniche, precisamente resistenza a trazione e a flessione e la riduzione delle deformazioni dovute al ritiro, ma anche degli effetti negativi, come ad esempio la riduzione della lavorabilità [1].

Come già accennato prima, esistono varie tipologie di fibre che possono essere introdotte nel calcestruzzo: le più utilizzate sono quelle metalliche, a cui seguono quelle polimeriche, quelle in vetro ed inoltre anche fibre naturali. La tipologia di fibra utilizzata, il quantitativo introdotto, la geometria della fibra e l'orientamento all'interno della matrice di calcestruzzo, sono tutti fattori che influenzano l'effetto apportato dalle fibre al calcestruzzo.

Focalizzando l'attenzione sul fenomeno di formazione delle macrocricche nel calcestruzzo, si può affermare che le fibre agiscono sia nella fase pre-fessurativa che nella fase post-fessurativa. Prima della formazione di macrocricche, nel calcestruzzo si riscontra già la presenza di miscrofessure, prima ancora dell'applicazione dei carichi esterni, dovute al ritiro e/o alle deformazioni termiche, e tali microfessure, vengono trattenute dalla presenza dell'aggregato grossolano. Introducendo le fibre nel calcestruzzo, oltre al contributo dell'aggregato grossolano, si avrà anche il contributo delle fibre; la matrice di calcestruzzo quindi, prima della fase fessurativa (macrocricche) trasferisce il carico alle fibre. Per tale motivo, introducendo delle fibre che presentano un modulo elastico maggiore rispetto quello della matrice di calcestruzzo, è possibile aumentare la resistenza del calcestruzzo, contrastando la formazione e la propagazione delle macrocricche.

Il contributo principale delle fibre apportato al calcestruzzo si nota maggiormente nella fase di formazione delle macrocricche, come è possibile notare dalla seguente figura [2]:



Figura 1.1: Effetto dell'aggregato e delle fibre nel processo di fessurazione nel caso di tensione uniassiale [2]

Nella Figura 1.1 viene mostrata la curva sforzo (di trazione) – deformazione, di una prova di trazione a controllo di deformazione, relativa ad un calcestruzzo tradizionale e ad un calcestruzzo fibrorinforzato in modo da poter cogliere il contributo apportato dalla presenza delle fibre. È possibile suddividere la curva in diverse zone in funzione del comportamento del materiale e dell'evoluzione del fenomeno fessurativo

all'aumentare del carico: nella prima parte della curva, dall'origine fino al punto A, nel materiale è presente solamente una microfessurazione che risulta indipendente dal carico applicato, dovuta ad esempio alle deformazioni da ritiro e/o alle deformazioni termiche; con l'aumentare del carico, si va incontro, dal punto A in poi, alla propagazione delle microfessure, inizialmente attraverso l'interfaccia tra l'aggregato e la pasta di cemento (dal punto A al punto B) e, successivamente, anche attraverso la malta (dal punto B al punto C). Raggiunto il carico di picco (punto C), la propagazione delle cricche diventa instabile ed inizia la formazione delle macrocricche che attraversano il provino, provocando una riduzione repentina del carico sostenuto dal materiale. Come si evince dal grafico, superato il picco, dopo una improvvisa caduta di tensione, si nota un rammollimento della curva, nella parte terminale che va dal punto D al punto E, in cui la caduta di tensione rallenta; questo è dovuto alla presenza dell'aggregato grossolano e alla presenza delle fibre che, per via dell'effetto ponte, creano un collegamento tra i due lembi delle fessure, contrastando pertanto la loro propagazione. Come si nota, l'effetto ponte apportato dalle fibre è molto più marcato e significativo rispetto all'effetto contrastante apportato dal solo aggregato grossolano.

In un calcestruzzo fibrorinforzato, la presenza delle fibre crea un collegamento tra i due lembi delle fessure, consentendo in tal modo di ottenere un incremento dell'energia di frattura e un aumento del valore di apertura critica della fessura (situazione in cui nella sezione vi è assenza di sollecitazioni) pari a circa 10 volte quello riscontrato in un calcestruzzo tradizionale [2]; pertanto, in un calcestruzzo fibrorinforzato si avrà l'effetto combinato dell'aggregato con quello delle fibre nel contrastare la propagazione delle fessure.

Bisogna aggiungere che, l'effetto apportato dalle fibre, oltre che dalla geometria, dalla tipologia e dal quantitativo utilizzato, è anche influenzato, in modo significativo, dall'orientamento che le fibre presentano nei confronti delle fessure. Il massimo effetto si ottiene quando le fibre risultano orientate perpendicolarmente allo sviluppo della fessura. L'orientamento delle fibre all'interno del calcestruzzo è influenzato dalle caratteristiche allo stato fresco della miscela, dalla geometria della cassaforma, dal tipo di getto e dalla modalità di vibratura del calcestruzzo. L'orientamento delle fessure può essere quantificato attraverso il numero di orientamento, che può assumere un valore compreso tra 0 e 1, assumendo il valore 0 quando la fibra risulta parallela alla superficie di interesse, oppure 1 quando risulta ortogonale [1].

Di seguito, vengono brevemente analizzati gli effetti, dovuti all'introduzione delle fibre nel calcestruzzo, sulle proprietà meccaniche allo stato indurito.

#### 1.1.1 Resistenza a compressione

L'introduzione delle fibre nel calcestruzzo non porta significativi miglioramenti nella resistenza a compressione, anzi, in alcuni casi, l'introduzione delle fibre sembra portare addirittura ad un peggioramento della resistenza a compressione.

Nello studio condotto da P.S. Song, S. Hwang [3], è stato studiato l'effetto apportato dall'introduzione di fibre in acciaio all'interno di un calcestruzzo ad alta resistenza, facendone variare anche il contenuto. Sono state utilizzate fibre d'acciaio ad uncino, con una lunghezza pari a 35 mm, un diametro nominale pari a 0,55 mm e un allungamento di 64 mm. In tale studio, è stato riscontrato che l'introduzione di fibre metalliche nel calcestruzzo ad alta resistenza portava ad un leggero incremento della resistenza a compressione, i cui valori variavano al variare del contenuto di fibre metalliche introdotte. Per una maggiora chiarezza, vengono riportati nella seguente tabella i risultati ottenuti dalle prove di compressione:

Tabella 1.1: Risultati dei test di compressione su provini in calcestruzzo tradizionale e ir
calcestruzzo fibrorinforzato [3]

Fiber volume	Compressive strength		
fraction (%)	Measured (MPa)	Strength- effectiveness <sup>a</sup> (%)	
0	85	_	
0.5	91	7.1	
1.0	95	11.8	
1.5	98	15.3	
2.0	96	12.9	

Sono state realizzate cinque differenti miscele facendo variare il contenuto di fibre tra una miscela e l'altra; è stata quindi realizzata una miscela priva di fibre e altre quattro miscele in cui il quantitativo di fibre introdotte è stato rispettivamente pari a 0.5%, 1%, 1.5% e 2%. Come si evince dalla Tabella 1.1, l'introduzione delle fibre nel calcestruzzo ad alta resistenza ha portato ad un leggero incremento della resistenza a compressione e, tale incremento, è stato differente al variare del quantitativo di fibre introdotte. Il maggiore incremento della resistenza a compressione, pari al 15,3%, è stato riscontrato nella miscela in cui è stato introdotto un quantitativo di fibre pari all'1.5%; si nota che, nelle miscele in cui è stato introdotto un quantitativo di fibre fino all'1.5%, la resistenza a compressione ha subito un incremento maggiore man mano che aumentava il quantitativo di fibre introdotte, invece, andando oltre tale quantitativo, la resistenza ha subito un decremento ma si è mantenuta comunque superiore a quella raggiunta dal calcestruzzo privo di fibre.

La lunghezza delle fibre è un fattore che influenza l'incremento della resistenza a compressione; si è visto, nei calcestruzzi fibrorinforzati con fibre in acciaio che, adottando delle fibre più corte si ottiene un maggiore incremento della resistenza a compressione rispetto quello ottenuto adottando fibre più lunghe. Le fibre più corte,

inoltre, contribuiscono maggiormente al controllo della fase iniziale della frattura, cercando di evitare la propagazione delle fessure di piccola entità mentre, le fibre più lunghe e resistenti controllano maggiormente le grandi fessure, cercando pertanto di creare un collegamento tra i lembi delle fessure, contrastando in tal modo la loro propagazione ed espansione; pertanto si potrebbe pensare di introdurre nel calcestruzzo delle fibre ibride e quindi, in base a quanto precedentemente detto, fibre con differente lunghezza, in modo tale da poter beneficiare al meglio di entrambi gli effetti e poter così controllare il processo di fessurazione a diversi livelli dimensionali, a differenti età di maturazione del calcestruzzo e in differenti zone dell'elemento strutturale [1].

La resistenza a compressione dei calcestruzzi fibrorinforzati può essere ulteriormente incrementata mediante l'introduzione di additivi in polvere, precisamente fumi di silice; questo è ciò che è stato rincontrato nello studio condotto da Fuat Köksal et al. [4]. In tale studio sono state realizzate delle miscele di calcestruzzo ad alta resistenza rinforzato con fibre metalliche ad uncino; sono inoltre stati adottati due differenti valori del rapporto di aspetto (lunghezza/diametro) e differenti contenuti di fumo di silice (5%, 10% e 20%). I risultati ottenuti vengono riportati nel seguente grafico:



Figura 1.2: Valori di resistenza a compressione su provini di calcestruzzo fibrorinforzato al variare del rapporto di aspetto, del fumo di silice e del quantitativo di fibre [4]

Sono stati utilizzati differenti contenuti di fibre nelle varie miscele realizzate, precisamente: 0,5% e 1%. Dalla Figura 1.2, si nota che, all'aumentare del contenuto di fibre, si ottengono valori di resistenza leggermente superiori, a prescindere dal contenuto introdotto di fumo di silice. Tale incremento risulta quasi trascurabile se confrontato all'incremento apportato dall'introduzione del fumo di silice in cui, in funzione del contenuto introdotto, pari al 5%, 10% e 15%, sono stati ottenuti degli incrementi della resistenza a compressione rispettivamente pari al 12%, 74% e 85,5%. Tali incrementi, così importanti, sono dovuti al fatto che il fumo di silice, per via

dell'effetto riempitivo, comporta un miglioramento nell'interfaccia cemento - aggregato, aumentandone la forza di adesione [4].

Un altro fattore che influenza la resistenza a compressione, come si nota dalla Figura 1.2, è il rapporto di aspetto, ovvero il rapporto tra la lunghezza delle fibre e il loro diametro. Si nota che, in generale, a parte qualche eccezione, un maggior valore del rapporto di aspetto porta ad ottenere un leggero incremento dei valori di resistenza a compressione.

Utilizzando quindi la combinazione di fibre in acciaio e fumo di silice si è riusciti ad ottenere, rispetto ad un calcestruzzo tradizionale, un notevole incremento della resistenza a compressione che, nel caso di un quantitativo di fibre in acciaio pari all'1% e ad un quantitativo di fumo di silice pari al 15%, è stato pari al 117.6% e 113.8%, per valori del rapporto di aspetto rispettivamente pari a 80 e 65.

#### 1.1.2 Resistenza a trazione

L'introduzione delle fibre nel calcestruzzo non comporta, come già visto, sostanziali miglioramenti nella resistenza a compressione, invece, per quanto riguarda la resistenza a flessione, la resistenza a trazione e l'energia di frattura, i miglioramenti ottenuti sono davvero importanti.

Focalizzando l'attenzione sulla resistenza a trazione, l'introduzione delle fibre in acciaio in un calcestruzzo tradizionale comporta un aumento sostanziale della resistenza. Questo viene messo in luce dallo studio condotto da P.S. Song, S. Hwang [3], in cui è stata valutata la resistenza a trazione mediante prove di trazione indiretta. Nelle differenti miscele di calcestruzzo fibrorinforzato sono state utilizzate delle fibre metalliche con estremità ad uncino, di lunghezza pari a 35 mm ed è stato analizzato l'effetto di tre differenti contenuti di fibre nelle miscele. Vengono di seguito riportati i risultati in forma tabellare nella Tabella 1.2:

Fiber volume	Compressive strength			Splitting tensile strength		
fraction (%)	Predicted (MPa)	Measured (MPa)	Prediction error <sup>a</sup> (%)	Predicted (MPa)	Measured (MPa)	Prediction Error (%)
0	85	85	0	5.8	5.8	0
0.5	91	91	0	7.3	6.9	5.80
1.0	95	95	0	8.8	8.7	1.15
1.5	97	98	-1.02	10.3	10.8	-4.63
2.0	96	96	0	11.7	11.5	1.74

Tabella 1.2: Risultati di resistenza a trazione indiretta al variare del contenuto di fibre [3]

Dai risultati si evince un sostanziale incremento della resistenza a trazione dovuto all'introduzione delle fibre metalliche nella miscela. All'aumentare del contenuto di fibre, è stata raggiunta una resistenza a trazione sempre maggiore, precisamente: con un quantitativo di fibre pari allo 0,5% si è ottenuto un incremento della resistenza a trazione, rispetto quella ottenuta da un calcestruzzo tradizionale privo di fibre, pari al 19%, invece, con un quantitativo di fibre pari al 2%, si è ottenuto addirittura un miglioramento della resistenza a trazione pari al 98,3%, raggiungendo una resistenza a trazione pari a 11,7 MPa invece che 5,8 MPa raggiunta dal calcestruzzo tradizionale.

Un ulteriore miglioramento della resistenza a trazione può essere ottenuto introducendo nella miscela fumo di silice, come mostrato dai risultati presenti nella Figura 1.3:



Figura 1.3: Valori della resistenza a trazione indiretta al variare del contenuto di fibre e del contenuto del fumo di silice

Dai risultati si nota che, l'introduzione del fumo di silice nelle miscele di calcestruzzo fibrorinforzato con fibre in acciaio, produce un ulteriore aumento della resistenza a trazione indiretta. All'aumentare del quantitativo di fumo di silice introdotto, aumenta sempre più la resistenza a trazione. L'incremento della resistenza a trazione dovuto alla sola introduzione del fumo di silice, quindi nelle miscele prive di fibre, è stato pari al 9.7%, 54% e 87.9%, per un contenuto di fumo di silice rispettivamente pari al 5%, 10% e 15% [4]. I maggiori valori della resistenza a trazione sono stati ottenuti nella miscela in cui è stato introdotto un quantitativo di fibre pari all'1%, per entrambi i rapporti di aspetto. A parità del contenuto di fibre e del fumo di silice, le fibre con un rapporto di aspetto più elevato, in generale, hanno portato ad ottenere valori di resistenza a trazione più elevati, il che significa che, le fibre più snelle portano ad ottenere delle prestazioni migliori [4].

### 1.1.3 Resistenza a flessione e tenacità

Il calcestruzzo, una volta fessurato, non sarà più in grado di portare alcun carico; pertanto, la presenza delle fibre, per via della creazione del collegamento tra i lembi delle fessure, contrastano la propagazione delle fessure e permettono di ottenere un calcestruzzo che risulta in grado di sostenere il carico anche dopo la fessurazione. Le fibre, infatti, fino a quando non viene compromesso il loro legame interfacciale con la matrice, andranno a sostenere il carico del calcestruzzo sostenuto prima della comparsa

delle fessure. Questo permette di ottenere un calcestruzzo con un comportamento non più fragile ma duttile, in quanto, una volta superato il carico di picco, non subisce un collasso improvviso ma continua a sopportare il carico.

Prendendo in considerazione le curve di sforzo – deformazione relative ai calcestruzzi tradizionali, si nota una fase ascendente della curva in cui è presente anche una certa linearità fino ad un certo livello del carico, ed una volta arrivati al picco, una improvvisa caduta della resistenza fino al collasso. Nei calcestruzzi tradizionali, la linearità, nella fase ascendente della curva, si presenta da circa un terzo fino a circa metà del carico massimo mentre, nei calcestruzzi ad alta resistenza, si va anche oltre fino ad arrivare a circa l'85% del carico e anche più; una linearità così elevata, nei calcestruzzi ad alta resistenza, è causata dall'assenza di microfratture per bassi livelli del carico. L'introduzione delle fibre non ha tanto effetto nella fase ascendente della curva ma soprattutto nella fase discendente post picco, andando ad incrementare notevolmente la duttilità del materiale post picco e l'assorbimento di energia [1].

Naturalmente, come già accennato prima, in funzione della tipologia, della geometria e del contenuto di fibre introdotte nella miscela, si ottiene un effetto più o meno marcato sulle proprietà meccaniche. È stato infatti dimostrato che la fibra in acciaio con le estremità ad uncino, è quella che porta al miglior incremento della tenacità rispetto a tutte le altre tipologie di fibre. Difatti, utilizzando invece una tipologia di fibra in acciaio differente, ad esempio delle fibre ondulate senza le estremità ad uncino, per raggiungere gli stessi risultati in termini di tenacità, sarebbe necessario introdurre un quantitativo nettamente superiore [1].

È stato inoltre riscontrato che, l'introduzione delle fibre, riesca a raddoppiare la resistenza a flessione con un contenuto pari all'1,25% mentre, sempre con lo stesso contenuto di fibre, si riesca addirittura ad ottenere una tenacità pari a circa 20 volte quella di un calcestruzzo tradizionale. Da ciò si deduce che le fibre risultano essere più efficaci nel migliorare la tenacità del materiale piuttosto che la resistenza a flessione [1].

Nello studio condotto da Vahid Afroughsabet e Togay Ozbakkaloglu [5], è stato studiato l'effetto sulla resistenza a flessione dovuto all'introduzione di fibre sia in acciaio, sia in polipropilene.

Vengono di seguito riportati i valori della resistenza a flessione delle miscele realizzate nella seguente figura:



Figura 1.4: Valori di resistenza a flessione di calcestruzzi fibrorinforzati con fibre di acciaio e con fibre di polipropilene [5]

In tutte le miscele, eccetto in una (Plain), è stato introdotto il fumo di silice in sostituzione al 10% del cemento in peso. Nella Figura 1.4(a) sono riportati i risultati relativi alle miscele di calcestruzzo rinforzato mediante l'utilizzo di fibre in polipropilene, con le seguenti frazioni in volume: 0.15%, 0.30% e 0.45%. Nella Figura 1.4(b), sono invece stati riportati i risultati della resistenza a flessione relativi alle miscele di calcestruzzo rinforzato mediante fibre in acciaio, con le seguenti frazioni in volume: 0.25%, 0.50%, 0.75% e 1%. Come si nota dalla Figura 1.4(a), l'introduzione di fibre di polipropilene nel calcestruzzo ha portato ad un miglioramento della resistenza a flessione, a prescindere dal quantitativo di fibre introdotto; precisamente, l'incremento ottenuto, è variato dal 5% al 14% rispetto ai valori di resistenza a flessione ottenuti dal calcestruzzo tradizionale [5]. Dalla Figura 1.4(b), si nota invece che le fibre in acciaio influenzano in modo differente, rispetto alle fibre in polipropilene, la resistenza a flessione. Difatti, introducendo le fibre in acciaio, si è ottenuto un incremento decisamente più importante raggiungendo, nel caso di un quantitativo di fibre introdotto pari all'1%, un incremento della resistenza a flessione pari al 61%, rispetto alla resistenza ottenuta da un calcestruzzo tradizionale privo di fibre. Le fibre in acciaio hanno influito maggiormente sulla resistenza a flessione sia per la maggiore lunghezza, sia per via della maggiore resistenza a trazione e del maggiore modulo elastico rispetto alle fibre in polipropilene; invece, le fibre in polipropilene, essendo più corte, hanno dato un maggior contributo nell'evitare la propagazione delle microfessure, non apportando in tal modo un incremento sostanziale alla resistenza a flessione [5].

È stato inoltre analizzato l'incremento di resistenza apportato dall'introduzione di entrambe le tipologie di fibre (acciaio e polipropilene), in proporzioni differenti, all'interno della miscela. Vengono di seguito riportati, nella Figura 1.5, i risultati ottenuti:



Figura 1.5: Valori di resistenza a flessione di calcestruzzo fibrorinforzati con fibre ibride (acciaio e polipropilene)

Sono state realizzate tre differenti miscele, facendo variare il contenuto delle due differenti tipologie di fibre introdotte. I migliori risultati sono stati ottenuti dalla miscela PP0.15ST0.85, in cui è stata utilizzata una frazione in volume di fibre di polipropilene pari allo 0,15% e una frazione di fibre di acciaio pari allo 0,85%, che ha raggiunto una resistenza a flessione inferiore solo del 5% rispetto quella raggiunta dalla migliore miscela con fibre in acciaio, ovvero la miscela ST1.0, con una frazione di fibre in acciaio pari all'1%. È stato inoltre riscontrato che, l'aumento del quantitativo di fibre di polipropilene introdotte, ha causato una riduzione della resistenza a flessione.

Come si evince dai risultati analizzati, l'introduzione del fumo di silice ha portato ad un miglioramento della resistenza a flessione; ciò, come anticipato precedentemente, ciò è dovuto al migliore legame che si viene a creare tra la matrice cementizia e l'aggregato, in quanto, l'idrossido di calcio che forma nella superficie delle particelle di aggregato si trasforma in silicato di calcio idrato per via della presenza della silice reattiva.

Il guadagno, in termini di resistenza a flessione, ottenuto dall'introduzione nella miscela di fumo di silice viene maggiormente messo in luce dallo studio condotto da Fuat Köksal et al. [4], in cui è stato valutato l'effetto del quantitativo di fumo di silice introdotto nella miscela di calcestruzzo, in funzione anche del differente quantitativo di fibre introdotte e del valore del rapporto di aspetto. Vengono di seguito riportati, nella figura, i risultati ottenuti:



Figura 1.6: Valori di resistenza a flessione di calcestruzzi fibrorinforzati al variare del contenuto di fibre, del quantitativo di fumo di silice e del rapporto d'aspetto [4]

In questo caso, in tutte le miscele sono state utilizzate fibre in acciaio con estremità ad uncino. Come si nota dai risultati riportati nella Figura 1.6, l'introduzione del fumo di silice ha apportato un sostanziale aumento della resistenza a flessione, come anche riscontrato per la resistenza a trazione e per la resistenza a compressione. Questo viene apprezzato meglio nelle miscele prive di fibre in cui, per un contenuto di fumo di silice pari al 5%, 10% e 15%, i rispettivi incrementi di resistenza sono stati pari al 7%, 42,1% e 64,9%. Considerando l'andamento generale dei valori di resistenza a flessione ottenuti, si nota come le fibre caratterizzate da un rapporto d'aspetto maggiore, a parità di contenuto del fumo di silice, hanno portato ad ottenere valori di resistenza maggiori [4].

#### 1.1.4 Durabilità del calcestruzzo fibrorinforzato

Il calcestruzzo è un materiale che tende facilmente a fessurarsi, ancora prima dell'applicazione dei carichi, per via delle deformazioni da ritiro o deformazioni termiche. Il ritiro rappresenta infatti una delle principali cause di fessurazione del calcestruzzo. A meno che l'elemento strutturale in calcestruzzo non sia sommerso in acqua, risulterà soggetto, per via dell'ambiente insaturo di vapore, ad un'evaporazione di acqua dall'impasto; questo porta ad avere deformazioni nel tempo, le cosiddette deformazioni da ritiro, con conseguente fessurazione nel calcestruzzo. Possono essere distinte due tipologie principali di ritiro dovuto all'evaporazione dell'acqua: il ritiro plastico e quello da essiccamento. Il ritiro plastico è quello a breve termine e si presenta già a partire dalle prime ore dal getto e permane fino a quando il calcestruzzo non abbia raggiunto una determinata resistenza a compressione, invece, il ritiro da essiccamento, permane per tutta la vita utile del calcestruzzo ed è quello maggiormente impattante per la durabilità de calcestruzzo.

La fessurazione rappresenta un fattore importante quando si parla di durabilità del calcestruzzo, in quanto può incentivare lo sviluppo di altri fenomeni di danno, come ad

esempio la corrosione delle armature, oppure danni causati dai cicli di gelo e disgelo, compromettendo in tal modo la vita utile della struttura.

### 1.2 Valutazione proprietà meccaniche calcestruzzi fibrorinforzati

L'obiettivo del presente lavoro sperimentale è stato quello di studiare la differente tipologia di fibre polimeriche nelle proprietà meccaniche di un calcestruzzo ordinario. Sono state precisamente studiate due differenti tipologie di fibre polimeriche CH e KM, calcolando l'influenza di entrambe le tipologie di fibre sui valori di resistenza a flessione per trazione e di resistenza a compressione. È stato inoltre studiato anche l'effetto del differente quantitativo introdotto nella miscela, precisamente: sono stati utilizzati i quantitativi pari a 2 kg/m<sup>3</sup> e 4 kg/m<sup>3</sup> per le fibre CH, invece 2 kg/m<sup>3</sup>, 3 kg/m<sup>3</sup> e 4 kg/m<sup>3</sup> per quanto riguarda le fibre KM.

Vengono di seguito riportata una breve spiegazione sulla tipologia delle prove eseguite e i risultati ottenuti.

#### 1.2.1 Test di flessione su tre punti e di compressione

Le prove di flessione sono state eseguite mediante l'utilizzo di una pressa idraulica MTS servo-controllata da 250 kN. Le prove sono tutte state condotte a controllo di apertura della fessura (CMOD) mediante l'utilizzo di un estensimetro installato su ogni trave durante la prova.

Sono stati realizzati dei provini di dimensioni 150 mm X 150 mm X 600 mm. I provini sono tutti stati scasserati dopo 24 ore dal getto e successivamente riposti all'interno di vasche per la fase di stagionatura. Prima di essere testati, sui campioni è stato eseguito un intaglio in una delle facce ortogonali a quella di getto.

La prova di flessione è stata eseguita a controllo di apertura della fessura (CMOD), controllando che la velocità di apertura della fessura aumentasse con una velocità pari a 0,05 mm/min, fino al raggiungimento di un valore del CMOD pari a 0,1 mm, per poi aumentarla a 0,2 mm/min fino alla fine della prova.

Le prove di compressione sono invece state eseguite utilizzando una pressa idraulica Galbadini da 3000 kN. Per i test di compressione sono stati realizzati provini cubici con i lati di dimensione pari a 150 mm.

Le prove di compressione sono state eseguite mediante l'applicazione di un carico costante pari a 0,6 MPa/s fino a rottura. I test a compressione sono stati realizzati lo stesso giorno delle prove di compressione.

Vengono di seguito riportati i valori di resistenza a trazione per flessione ottenuti mediante le prove di flessione su tre punti.

### 1.2.2 Valori di resistenza a flessione su tre punti

Vengono di seguito riportati, in forma tabellare (Tabella 1.3), al variare della tipologia e del quantitativo di fibre, i risultati ottenuti dalle prove di flessione su tre punti:

Tabella 1.3: Valori di resistenza a flessione sui provini di calcestruzzo fibrorinforzato al variare della tipologia e del quantitativo di fibre

Series	Samples	b [mm]	h [mm]	h <sub>sp</sub> [mm]	LOP [MPa]	f <sub>R,1</sub> [MPa]	f <sub>R,2</sub> [MPa]	f <sub>R,3</sub> [MPa]	f <sub>R,4</sub> [MPa]
	1	151.5	150.2	125.8	5.1	1.1	0.8	0.8	0.8
	2	150,5	150,0	126,0	5,2	, 0,8	0,7	0,7	0,7
	3	151,3	150,3	125,9	4,9	0,8	0,7	0,7	0,8
CH2	mean		· · ·		5,1	0,9	0,8	0,8	0,8
	st.dev				0,1	0,2	0,1	0,0	0,0
	cov [%]				2,8	20,5	8,8	5,5	4,3
CH4	1	151,9	150,3	125,7	4,7	1,4	1,4	1,4	1,4
	2	150,9	150,7	126,0	4,7	1,3	1,2	1,3	1,3
	3	150,2	150,1	126,0	5,1	1,4	1,4	1,5	1,5
	mean				4,9	1,4	1,3	1,4	1,4
	st.dev				0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
	cov [%]				5,0	5,8	5,9	5,5	6,6
	1	151,8	150,3	125,9	5,1	1,0	0,9	0,9	0,8
	2	149,0	150,2	126,0	5,4	0,9	0,7	0,7	6,6 0,8 0,7 1,1 <b>0,9</b> 0,3 30,0
KN12	3	150,6	150,5	125,7	4,8	1,0	1,1	1,1	
RIVIZ	mean				5,1	1,0	0,9	0,9	0,9
	st.dev				0,3	0,1	0,2	0,2	0,3
	cov [%]				6,4	5,3	21,5	26,6	30,0
	1	151,3	150,6	126,0	4,7	1,1	1,1	1,1	1,1
	2	150,6	150,5	126,0	5,7	1,1	1,0	1,1	1,1
KM3	3	151,7	150,4	126,0	5,0	1,3	1,2	1,2	1,2
КМЗ	mean				5,1	1,2	1,1	1,1	1,1
	st.dev				0,5	0,1	0,1	0,0	0,0
	cov [%]				10,6	8,8	11,0	2,9	1,5
	1	150,9	150,3	126,0	4,7	1,4	1,6	1,7	1,7
кма	2	151,1	149,9	126,0	5,3	1,8	2,2	2,2	2,2
	3	150,3	150,3	125,9	5,1	1,5	1,8	1,9	1,8
	mean				5,0	1,6	1,8	1,9	1,9
	st.dev				0,3	0,2	0,3	0,2	0,3
	cov [%]				5,9	11,7	15,0	12,1	14,6
RFF	1	150,3	150,1	125,6	4,4	0,3	-	-	-
	2	150,4	150,2	125,3	4,5	0,4	-	-	-

3	151,3	150,3	125,3	4,2	0,3	-	-	
mean				4,4	0,3	-	-	
st.dev				0,2	0,0	-	-	
cov [%]				3,5	11,2	-	-	

Al fine di ottenere un migliore confronto relativo ai valori di resistenza al variare della tipologia di fibre utilizzata e del quantitativo introdotto nella miscela, viene di seguito riporta un istogramma nella Figura 1.7, in cui sono stati riportati tutti i risultati ottenuti dal test di flessione:



Figura 1.7: Comparazione dei valori di resistenza a flessione ottenuti dai test, al variare della tipologia e del quantitativo di fibre

Per avere un'idea del percorso fessurativo che si viene a creare durante il test di flessione, vengono di seguito riportate le foto in Figura 1.8 dei provini più significativi, sotto questo punto di vista:


Figura 1.8: Foto dei campioni più significativi in cui si riesce ad apprezzare il percorso fessurativo

Dalle prove di flessione su tre punti vengono ricavate le curve carico – apertura della fessura (CMOD). Vengono in particolare calcolati i valori della tensione al limite di proporzionalità (LOP), ovvero la tensione relativa al massimo valore della forza applicata e i valori delle resistenze residue  $f_R$ .

Vengono di seguito riportate le curve Carico - CMOD relativo ai test di flessione eseguiti:



Figura 1.9: Curve Carico – CMOD per campioni con 2 kg/m<sup>3</sup> di fibre CH



Figura 1.10: Curve Carico – CMOD per campioni con 4 kg/m<sup>3</sup> di fibre CH



Figura 1.11: Curve Carico – CMOD per campioni con 2 kg/m<sup>3</sup> di fibre KM, monofilamento di 54 mm



Figura 1.12: Curve Carico – CMOD per campioni con 3 kg/m<sup>3</sup> di fibre KM, monofilamento di 54 mm



Figura 1.13: Curve Carico – CMOD per campioni con 4 kg/m<sup>3</sup> di fibre KM, monofilamento di 54 mm



Figura 1.14: Curve Carico – CMOD per campioni di riferimento (senza fibre)

Nel provino REF, essendo privo di fibre si è stati costretti ad interrompere la prova al primo valore residuo di capacità flessionale, quindi con una apertura della fessura pari a 0,5 mm. Tutti i campioni fibrorinforzati, come atteso, manifestano un incremento della resistenza a trazione per flessione massima (LOP); si nota anche che, il valore di resistenza a trazione per flessione massima (LOP) è circa lo stesso in tutte le configurazioni studiate: dosaggio di fibre e tipo di fibre. La tipologia di fibre e il dosaggio di fibre hanno invece un'influenza positiva su quelle che sono le resistenze residue dei campioni; in generale, si nota un incremento delle capacità flessionali residue al crescere del dosaggio da 2 a 4 kg/m<sup>3</sup>, sia per le fibre CH, sia per le fibre KM. A parità di dosaggio di fibre, le fibre KM risultano migliori delle fibre CH. Questo comportamento è dovuto ad una migliore aderenza delle fibre KM rispetto alle fibre CH con la matrice cementizia. La migliore aderenza è stata ottenute grazie alla realizzazione sulla superficie di queste fibre di particolari lavorazioni, simili a bugnature, che si sono rivelate un metodo semplice ma efficace per il miglioramento delle prestazioni dei calcestruzzi fibrorinforzati. Infine, dalla figura 3, è interessante notare come le fibre KM non inficiano la lavorabilità della miscela che, a differenza di quella relativa alle fibre CH, è pressoché identica a quella del materiale di riferimento:



Figura 1.15: Proprietà allo stato fresco, risultati dello slump test

## **Capitolo 2**

### Introduzione

Nel presente capitolo viene introdotto il calcestruzzo schiumato, presentando i principali ingredienti che caratterizzano la miscela base ed analizzando le caratteristiche che contraddistinguono questa tipologia di calcestruzzo. Sono inoltre stati messi in evidenza i principali punti di forza che caratterizzano il calcestruzzo schiumato riportando qualche accenno sulle buone proprietà di isolamento termico e di resistenza al fuoco, confrontandole con quelle di un calcestruzzo tradizionale. Successivamente è stato riportato un approfondimento sulle schiume, ingrediente fondamentale per il calcestruzzo schiumato, analizzando inizialmente le proprietà e la stabilità dei sistemi dispersi, concentrandosi poi sulla stabilità della schiuma ed infine sulla sua stabilità una volta introdotta nel calcestruzzo schiumato. Il capitolo prosegue mediante la trattazione delle principali caratteristiche del calcestruzzo schiumato: sono state analizzate sia le caratteristiche della miscela allo stato fresco (consistenza e stabilità), sia le caratteristiche del calcestruzzo indurito in termini di proprietà meccaniche (resistenza a compressione, trazione e modulo elastico) riportando i principali fattori impattanti, e di durabilità, prestando attenzione all'influenza della permeabilità e valutando i potenziali danni dovuti all'esposizione del calcestruzzo schiumato in ambienti aggressivi. Nell'ultima parte del capitolo viene affrontata l'ottimizzazione della miscela che consente il raggiungimento di valori di resistenza adeguati ad un utilizzo del calcestruzzo schiumato anche in ambito strutturale.

## 2 Il calcestruzzo schiumato

#### 2.1 Caratteristiche peculiari e applicazioni del calcestruzzo schiumato

#### 2.1.1 Il calcestruzzo schiumato: un materiale innovativo

Il calcestruzzo schiumato appartiene alla categoria dei calcestruzzi alleggeriti, precisamente ai calcestruzzi cellulari, caratterizzati da densità comprese circa tra 300 kg/m<sup>3</sup> e 1800 kg/m<sup>3</sup>, inferiori rispetto ai tradizionali calcestruzzi [6], che vengono raggiunte mediante la presenza di un sistema di vuoti casuali non connessi all'interno della miscela, generati per via della presenza di un agente schiumogeno che viene miscelato con la malta. Il calcestruzzo schiumato presenta una miscela abbastanza

fluida e lavorabile con un contenuto piuttosto basso di cemento. Il principale punto di forza di questa tipologia di calcestruzzo riguarda sicuramente il ridotto peso del materiale e quindi le ridotte densità che si possono ottenere, consentendo in tal modo di realizzare elementi costruttivi, e in generale strutture, più leggere, ottenendo dei vantaggi economici sia per via della minore quantità di materiale necessaria per la realizzazione della struttura, sia sulla manodopera. Inoltre, la struttura porosa del materiale dovuta alla presenza del sistema di vuoti al suo interno consente di ottenere vantaggi non solo in termini di peso, ma anche in termini di isolamento termico, isolamento acustico e di resistenza al fuoco [7].

Il calcestruzzo schiumato, a differenza dei calcestruzzi tradizionali, non presenta aggregati grossolani (ghiaia), infatti è costituito da una malta (acqua, sabbia e cemento) alla quale viene aggiunta una schiuma che comporta la formazione di bolle, e quindi, di un sistema di vuoti al suo interno, al quale possono essere aggiunti additivi e fibre per poter raggiungere le caratteristiche richieste in termini di lavorabilità e proprietà meccaniche. Il legante è principalmente costituito da cemento, solitamente cemento Portland ordinario, che potrebbe anche essere sostituito in parte, tra il 10% e il 75%, con additivi minerali (fumo di silice, cenere volante, scorie) al fine di migliorarne la consistenza e le proprietà meccaniche [7]. Naturalmente, ogni elemento aggiuntivo che viene introdotto nella miscela di calcestruzzo schiumato consente di modificarne le caratteristiche in modo differente; difatti, sostituendo per esempio fumo di silice a parte del cemento viene migliorato lo sviluppo della resistenza nel breve termine, invece, introducendo cenere volante e sostituendola a parte del cemento, lo sviluppo di resistenza del calcestruzzo risulterà più lento [7], motivo per il quale è necessaria un'attenta progettazione del mix design per ottenere le caratteristiche desiderate.

Come già accennato, una delle caratteristiche peculiari di un calcestruzzo cellulare è proprio la presenza delle bolle all'interno della miscela. Tale sistema di vuoti può essere generato principalmente in due modi: mediante l'introduzione nella miscela di opportune sostanze (perossido di idrogeno, ossido di alluminio, carburo di calcio) che, una volta miscelate con gli altri ingredienti, comportano la formazione di una reazione chimica con conseguente sviluppo di gas; in tal caso il calcestruzzo cellulare prende il nome di calcestruzzo aerato, oppure mediante l'aggiunta di un agente schiumogeno che reagendo con l'acqua comporta la formazione di una schiuma e quindi di bolle all'interno della miscela. In quest'ultimo caso, il calcestruzzo cellulare prende il nome di calcestruzzo schiumato e può essere realizzato in due modi differenti: il primo consiste nel preparare separatamente la malta e la schiuma (miscelando agente schiumogeno e acqua mediante una miscelazione turbolenta) e, una volta pronta la schiuma, viene introdotta e miscelata nella malta; oppure, si realizza la malta e si introduce l'agente schiumogeno direttamente nella malta e, tramite la miscelazione e la reazione dell'agente schiumogeno con l'acqua, si avrà la formazione del sistema di vuoti all'interno della miscela [6].

Esistono differenti tipologie di agenti schiumogeni e quelli più frequentemente utilizzati sono: agenti schiumogeni sintetici e agenti schiumogeni a base proteica. Gli agenti schiumogeni proteici consentono di ottenere un sistema di vuoti d'aria più stabile rispetto a quello generato mediante l'utilizzo di un agente schiumogeno sintetico, che produce delle bolle che tendono ad espandersi maggiormente, riducendo pertanto la densità del composto [7]. In tale tipologia di calcestruzzo la quantità di agente schiumogeno introdotta, aumenta la quantità di schiuma prodotta e questo comporta una riduzione della densità e una variazione delle caratteristiche del calcestruzzo sia allo stato fresco, sia allo stato indurito. Le proprietà meccaniche di un calcestruzzo schiumato sono influenzate sia dalla quantità di schiuma che dal rapporto acqua/cemento, in particolare la resistenza a compressione è fortemente influenzata dalla quantità, dalla tipologia e dalla qualità dell'agente schiumogeno [6].

La quantità di acqua da introdurre nell'impasto viene determinata in base alla consistenza e alla stabilità della miscela che si vuole raggiugere. Riducendo il contenuto d'acqua si ottiene una miscela più rigida e più difficile da miscelare, che può portare alla rottura di parte delle bolle introdotte con la schiuma e quindi ad un aumento della densità; invece, un contenuto di acqua troppo elevato potrebbe portare ad ottenere un impasto incapace di trattenere le bolle ed avere quindi la segregazione della schiuma dalla miscela con conseguente aumento della densità [7].

Come già anticipato prima, la presenza del sistema di vuoti all'interno della miscela del calcestruzzo schiumato gli conferisce anche buone proprietà di isolamento acustico, isolamento termico e di resistenza al fuoco. Distaccandosi un po' da quello che è l'oggetto di questa ricerca, vengono di seguito riportati solo alcuni accenni che riguardano le suddette caratteristiche.

#### 2.1.1.1 Caratteristiche funzionali del calcestruzzo schiumato

Il calcestruzzo schiumato gode di buone proprietà di isolamento termico, con valori di conducibilità termica che si aggirano intorno a 0.66 W/mK per una densità pari a 1600 kg/m<sup>3</sup>, che risultano quindi migliori rispetto a quelle di un calcestruzzo tradizionale, la cui conducibilità termica è circa pari a 1.6 W/mK per una densità pari a 2200 kg/m<sup>3</sup> [7]. Valori così bassi di conducibilità termica consentono al calcestruzzo schiumato di poter essere utilizzato ad esempio per la realizzazione di pannelli isolanti da introdurre nelle abitazioni, in modo da poter ottenere dei guadagni economici per via del risparmio di energia elettrica dovuta ad un minor utilizzo dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento. Le proprietà di isolamento termico di un calcestruzzo schiumato sono certamente influenzate dalla densità, che aumentando provoca un aumento della conducibilità termica e quindi un peggioramento delle proprietà termoisolanti del calcestruzzo schiumato. L'isolamento termico totale del calcestruzzo schiumato può subire infatti una riduzione di circa 0.04 W/mK per ogni riduzione della densità pari a 100 kg/m<sup>3</sup>. È stato anche riscontrato che l'isolamento termico nei calcestruzzi schiumati è anche condizionato dalla tipologia di aggregato e dagli additivi minerali introdotti nella miscela. Difatti, utilizzando aggregati leggeri, un calcestruzzo schiumato con una densità di 1000 kg/m<sup>3</sup> può raggiungere valori di conducibilità termica sei volte inferiori rispetto ai valori raggiunti da una classica malta costituita da sabbia e cemento [7]. Anche la tipologia di agente schiumogeno può influenzare le proprietà di assorbimento e di isolamento termico di un calcestruzzo schiumato. Naturalmente, gioca un ruolo importante lo spessore dell'elemento che si realizza con il calcestruzzo schiumato, che al suo incremento comporta migliori proprietà di isolamento termico [7].

Il calcestruzzo schiumato gode anche di buone caratteristiche di resistenza al fuoco se confrontato con un calcestruzzo tradizionale, che risultano condizionate dal mix design, dalla tipologia dei vari componenti e dalla densità. Al diminuire della densità il calcestruzzo schiumato mostra proprietà di resistenza al fuoco sempre migliori a tal punto da raggiungere, per una densità di 150 kg/m<sup>3</sup>, una resistenza al fuoco circa tre volte superiore rispetto quella raggiunta da un calcestruzzo schiumato con una densità di 450 kg/m<sup>3</sup>. Un calcestruzzo schiumato con una densità di 950 kg/m<sup>3</sup> è in grado di resistere al fuoco per circa tre ore e mezza e, nel caso di un calcestruzzo schiumato con cemento che presenti un rapporto Al2O3/CaO superiore a 2, di resistere a temperature fino a 1450 °C senza subire danneggiamenti.

Una criticità è legata all'eccessivo ritiro subito dal calcestruzzo schiumato dovuto all'eccessivo tasso di evaporazione quando soggetto ad elevate temperature [7].

#### 2.2 Le schiume

#### 2.2.1 Sistemi omogenei ed eterogenei

Il mondo che ci circonda è costituito da materia. È possibile definire sistema una porzione delimitata di materia, oggetto di studio, con un preciso comportamento chimico oppure fisico. Esistono differenti tipi di sistemi, in funzione delle fasi da cui essi sono costituiti.

Quando il sistema presenta un'unica fase, viene definito omogeneo. Quando, invece, il sistema è caratterizzato dall'avere due o più fasi, il sistema viene definito eterogeneo. Focalizzando l'attenzione su un composto chimico di vitale importanza per l'essere vivente, quale l'acqua, è possibile poter fare un esempio pratico di sistema omogeneo e di sistema eterogeneo. Prendendo infatti un bicchiere d'acqua potabile, è immediato notare visivamente l'aspetto uniforme che presenta la sostanza. Caratteristica peculiare dei sistemi omogenei è l'esser costituiti da materia che presenta le stesse proprietà, in termini di composizione, di densità, di colore, ecc.

Quando il bicchiere è invece riempito con dell'acqua frizzante, la situazione cambia. Acqua e gas, infatti, sono due fasi distinte. In quest'ultimo caso, ci si trova davanti ad un sistema eterogeneo. Si nota subito che, tra acqua e gas, varia il colore, come anche la densità. Quindi, il composto, presenterà al suo interno una variabilità delle proprietà intensive.

I sistemi eterogenei, quindi, presentano differenti proprietà nelle diverse parti costituenti, separate tra loro da vere e proprie superfici di separazione. Tali superfici di separazione, non sempre sono facilmente distinguibili ad occhio nudo e talvolta risulta necessario ricorrere ad un'esaminazione più accurata.

Quando un sistema è formato da sostanze diverse ma risulta essere fisicamente omogeneo, tale sistema è un miscuglio omogeneo, o anche detto soluzione. Le soluzioni sono infatti miscele omogenee di più sostanze. Nelle soluzioni, la sostanza in quantità maggiore viene chiamata solvente, mentre, quella/e in minore quantità, soluto.

#### 2.2.2 Sistemi dispersi

La maggior parte dei sistemi naturali è di tipo colloidale. Essi presentano caratteristiche intermedie tra i miscugli omogenei ed i miscugli eterogenei.

I sistemi colloidali sono principalmente costituiti da due fasi, una fase cosiddetta disperdente ed una fase dispersa. La fase dispersa è caratterizzata da particelle di dimensioni microscopiche che risultano separate da ampie regioni che contengono le molecole della fase disperdente. Quest'ultima viene anche definita fase continua ed è la fase che conferisce le proprietà fisiche macroscopiche all'intero sistema.

#### 2.2.2.1 Stabilità dei sistemi dispersi

Nei sistemi colloidali, le particelle sospese tendono a rimanere stabili senza necessitare di alcuna agitazione. Questo è dovuto al moto browniano, un moto continuo e irregolare cui sono soggette le particelle colloidali, che contribuisce quindi alla stabilità del sistema. Esso è generato dagli urti tra le particelle della fase dispersa e le molecole della fase in cui sono disperse. Tale moto è condizionato dalla dimensione delle particelle, dalla temperatura come anche dalla viscosità del mezzo disperdente.

Il moto browniano, quindi, conferisce stabilità al sistema, contrastando la sedimentazione per effetto della forza di gravità. Ciò non accade per esempio nelle sospensioni, in cui le particelle, avendo una maggiore dimensione, se non soggette ad alcuna agitazione, tenderanno a precipitare e quindi a sedimentare per effetto della gravità [8].

Bisogna però aggiungere che il solo moto browniano non garantisce la stabilità del sistema colloidale. Le particelle della fase dispersa possono ad esempio trovarsi a distanze molto ravvicinate, arrivando anche a collidere, con la tendenza in questo caso di potersi aggregare. Questo è dovuto alla presenza di forze di natura attrattiva, le cosiddette forze di van der Waals.

Per comprendere al meglio la stabilità dei sistemi dispersi, bisogna innanzitutto capire l'interazione tra le particelle presenti in essi. Gioca un ruolo importante per la stabilità del sistema la distribuzione delle cariche sulla superficie di ogni singola particella. Ogni particella, infatti, possiede sulla sua superficie delle cariche

elettrostatiche, che possono esercitare un'azione attrattiva o repulsiva in funzione della carica della particella con cui interagisce. Più precisamente, eserciteranno un'azione attrattiva nei confronti di particelle che possiedono una carica di segno opposto, oppure, un'azione repulsiva nei confronti di particelle che possiedono una carica del medesimo segno [9]. Queste sono le due principali tipologie di interazione tra le particelle del sistema, a cui se ne aggiunge una terza, la cosiddetta interazione sterica. Possiamo quindi riassumerle in tale elenco:

- Interazione attrattiva
- Interazione repulsiva elettrostatica
- Interazione sterica

Ciascuna di tali interazioni contribuisce in modo differente all'energia potenziale del sistema, la quale sarà quindi pari alla somma dei tre contributi:

$$V = V_A + V_{RE} + V_S \tag{1}$$

Le forze di natura attrattiva sono forze intermolecolari, anche note come forze di van der Waals. Immaginando di avere due particelle uguali, indeformabili e di forma sferica, l'entità di tale contributo può essere semplicemente valutato mediante la seguente espressione:

$$V_A = -A \frac{r}{r_e} \tag{2}$$

In cui:

A = costante di Hamaker

r = raggio della particella

 $r_e$  = distanza tra le superfici delle particelle, con  $r_e$  < r

La costante di Hamaker dipende dalla polarizzabilità delle particelle all'interfaccia e può essere calcolata in modo approssimato mediante la seguente espressione:

$$A = \pi^2 q^2 \beta \tag{3}$$

In cui:

 $\beta$  = costante di interazione di London delle particelle

q = densità delle particelle

Per un maggiore approfondimento sull'interazione elettrostatica tra le particelle, viene preso in considerazione il modello DLVO (Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek), il quale rappresenta, come mostrato in Figura 2.1, la zona interposta tra la superficie

della particella e l'interfase, ovvero la fase continua in cui risulta essere dispersa, come un doppio strato elettrico:



Figura 2.1: Doppio strato elettrico, modello DLVO

Dalla figura è possibile distinguere tre zone:

- Il core della particella, che possiede una certa carica
- Lo Strato di Stern
- Lo Strato di Gouy-Chapman

Lo strato di Stern, anche definito strato stazionario, è quello più prossimo al core della particella ed è caratterizzato dall'avere dei confini ben definiti. Al suo interno vi è la presenza degli ioni adsorbiti sulla superficie della particella. Questa risulta essere la parte più interna del doppio strato elettrico. Nella parte più esterna ritroviamo lo Strato di Gouy-Chapman, anche noto come strato diffuso. In questo strato le interazioni risultano avere una minore intensità, sono quindi più deboli. Tale strato risulta essere diffuso a causa dell'agitazione termica e del gradiente di concentrazione rispetto all'interfase. Il gradiente, infatti, contrasta il campo elettrico superficiale delle particelle. È possibile notare l'elevata concentrazione di controioni, ovvero ioni di carica opposta rispetto a quella posseduta dalla particella, in prossimità della sua superfice.

Lo spessore del doppio strato elettrico può essere calcolato con la seguente formula, secondo il modello Debye-Hückel:

$$k^{-1} = \left(\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{e^2I}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

Una volta determinato lo spessore del doppio strato elettrico, è possibile definire il contributo dell'interazione di repulsione elettrostatica, generata dall'overlap degli strati elettrici delle due particelle, mediante la seguente espressione:

$$V_{RE} = 2\pi r \varepsilon \varepsilon_0 \Psi_0^2 \ln[1 + \exp(-kr_e)]$$
(5)

In cui:

ε: costante dielettrica della fase continua

 $\varepsilon_0$ : costante dielettrica del vuoto

 $\Psi_0$ : potenziale elettrostatico di superficie

*I*: forza ionica della fase continua

Il potenziale elettrico varia in funzione della distanza delle particelle. Presenta, quindi, i valori massimi in prossimità della superficie delle particelle, per poi diminuire repentinamente man mano che ci si allontana.

È possibile descrivere più approfonditamente l'andamento del potenziale elettrico mediante il seguente grafico:



Figura 2.2: Andamento del potenziale elettrostatico in funzione della distanza tra due particelle della fase dispersa

Il grafico risulta essere diviso in due zone dall'asse delle ascisse. La zona superiore è quella relativa alla repulsione elettrostatica, mentre quella inferiore relativa all'attrazione di van der Waals.

Il grafico è costituito da tre curve. Quella più in alto, rappresenta l'andamento dell'energia potenziale elettrostatica in funzione della distanza tra due particelle. È possibile notare quanto velocemente aumenta tale energia al diminuire della distanza

tra le due particelle. Stessa cosa può essere detta sull'energia potenziale elettrostatica attrattiva, il cui andamento in funzione della distanza tra le due particelle è rappresentato dalla curva in basso. Analogamente l'energia potenziale elettrostatica attrattiva aumenta man mano che la distanza tra le particelle si riduce, ma in questo caso l'aumento risulta essere più veloce se confrontato con quello relativo all'energia potenziale elettrostatica negativa. Infine, vi è la curva centrale, ottenuta dalla somma delle altre due curve, e rappresenta l'andamento dell'energia potenziale elettrostatica totale. Si nota che, quando la distanza tra le due particelle è davvero ridotta, e risultano quindi essere quasi in contatto, si ha una prevalenza delle forze attrattive su quelle di natura repulsiva mentre, quando la distanza aumenta, si presenta la situazione opposta, con conseguente instabilità del sistema [9].

Le forze repulsive elettrostatiche apportano quindi al sistema un contributo stabilizzante, evitando che le particelle si avvicinino eccessivamente, tendendo quindi ad aggregarsi, e contrastando le forze di natura attrattiva che tendono invece a destabilizzare il sistema.

Nella curva centrale si possono distinguere tre punti singolari:

- Punto di minimo principale Vmin
- Punto di massimo (positivo) Vmax
- Punto di minimo relativo Vrel

Il punto di minimo principale rappresenta la situazione in cui le due particelle sono quasi a contatto e la loro distanza risulta essere paragonabile a quella di un legame chimico; in questo caso il sistema tende al fenomeno della flocculazione. All'aumentare della distanza interparticellare si arriva al punto di massimo, che rappresenta una sorta di barriera energetica protettiva, per via della presenza delle forze di repulsione elettrostatica, nei confronti del comportamento instabilizzante che si presenta quando le particelle sono troppo vicine. Una riduzione del  $V_{max}$  porterebbe ad una minore stabilità del sistema disperso, in quanto aumenterebbe la possibilità di avere flocculazione. Questo succede, ad esempio, in caso di presenza di elettroliti nella fase continua, che comporta un aumento della forza ionica della fase disperdente e quindi conseguente diminuzione del  $V_{max}$ . Successivamente, ad un ulteriore aumento della distanza, vi è la presenza del punto di minimo relativo cui è associata l'energia potenziale relativa ad un sistema disperso stabile. Come accennato prima, un'ulteriore interazione tra le particelle disperse è quella di tipo sterico. Questo tipo di interazione può portare ad un contributo favorevole alla stabilizzazione del sistema. È un'interazione che si presenta quando delle macromolecole vengono adsorbite sulla superficie delle particelle, creando una sorta di ingombro sterico. Tali macromolecole creano uno strato protettivo, caratterizzato da un certo spessore, che impedisce alle particelle di avvicinarsi in modo eccessivo, esercitando quindi un ulteriore effetto repulsivo che risulta stabilizzante per il sistema disperso. Ovviamente, gioca un ruolo fondamentale la natura chimica del solvente. Infatti, è possibile classificare il solvente in due modi: buon solvente oppure cattivo solvente.

Un buon solvente impedisce o ritarda il processo di flocculazione, in quanto sarà sempre interposto tra le particelle disperse. Viceversa, nel caso di cattivo solvente, le particelle della fase dispersa tenderanno ad avvicinarsi eccessivamente, risultando in tal modo predominanti le forze attrattive di van der Waals alle forze repulsive e le particelle tenderanno quindi a flocculare. Un elemento importante da considerare è la temperatura critica di flocculazione (CFT), che corrisponde a quel valore di temperatura, oltre la quale, un buon solvente diventa un cattivo solvente e il sistema disperso con macromolecole adsorbite nelle particelle della fase dispersa, floccula.

L'interazione sterica repulsiva comporta una variazione dell'energia libera, che può essere quantificata mediante la seguente formula:

$$\Delta_m G = \alpha f\left(\frac{V_c}{V_0}\right) \left(1 - \frac{\theta}{T}\right) \tag{6}$$

In cui:

 $V_c$ : volume delle catene idrofobiche

 $V_0$ : volume di overlap tra particelle prossime vicine

 $\alpha$ : costante

 $\theta$ : temperatura critica di flocculazione

Oltre a questa componente dell'interazione sterica, definita volumica, come mostrato in Figura 2.3, esiste una seconda componente, quella osmotica, nel caso in cui vi fosse la presenza nella fase continua, di macromolecole disciolte non adsorbibili dalla superficie delle particelle:



Figura 2.3: Rappresentazione del fenomeno di flocculazione impoverita

Queste macromolecole, come mostrato in figura 1.3, si troveranno anche nella zona interposta tra due particelle, modificando la loro conformazione qualora il volume a disposizione, per effetto dell'avvicinamento delle particelle, si dovesse ridurre. In tal caso, se l'avvicinamento delle particelle dovesse risultare eccessivo sarebbero espulse dalla zona interparticellare con conseguente variazione di concentrazione del soluto in questa regione, che ne risulterà impoverita. In questa regione della fase continua si avrà dunque un gradiente di pressione osmotica, per effetto della differente concentrazione di soluto rispetto alle altre zone della fase continua, che porterà le particelle disperse ad avvicinarsi e a flocculare. Tale flocculazione viene definita flocculazione impoverita.

#### 2.2.2.2 Stabilità della schiuma

Innanzitutto, è necessario introdurre il concetto di tensione superficiale. Prendendo in considerazione un liquido, ogni particella al suo interno risulta soggetta a forze attrattive per via dell'interazione che tale particella presenta con le altre particelle che la circondano. Tali forze attrattive sono dirette in tutte le direzioni e si bilanciano. Risulta differente la situazione per le particelle che si trovano in superficie. In questo caso, una singola particella sarà soggetta a forze attrattive soltanto lateralmente e verso il basso; quindi, verrà in un certo senso attirata verso il basso, verso l'interno del liquido. Stessa cosa varrà per tutte le altre particelle presenti in superficie. Quello che si ottiene è che la superficie libera del liquido tenderà ad occupare la minore estensione possibile, contraendosi. La tensione superficiale viene definita come l'energia che occorre per aumentare di una unità la sua area superficiale  $(J/m^2)$ . La tensione superficiale aumenta all'aumentare delle forze intermolecolari e diminuisce all'aumentare della temperatura, in quanto una temperatura più alta porta ad avere una maggiore agitazione termica delle particelle e questo indebolisce i legami [8]. Nel caso dei sistemi dispersi, considerando l'interfaccia liquido-liquido oppure solido-liquido tra le fasi del sistema, si parla di tensione interfacciale. Essa tenderà a far aggregare le particelle della fase dispersa proprio per ridurre il più possibile l'estensione superficiale delle stesse [10].

Prendendo in considerazione i sistemi colloidali, affinché essi siano stabili, è necessario che il valore della tensione superficiale venga ridotto; ciò risulta possibile mediante l'utilizzo di tensioattivi [11]. Le molecole di tensioattivo sono anfipatiche, ovvero costituite da un grippo idrofobo e da un gruppo idrofilo. Nelle schiume, tale struttura ne favorisce l'adsorbimento e le molecole di tensioattivo si orientano con la testa idrofila a contatto con la fase acquosa e con la coda idrofoba a contatto con la fase gassosa. Esistono diverse tipologie di tensioattivi, i quali possono essere classificati in base alla loro origine (sintetica o naturale), in base al loro impiego (schiumogeni, disperdenti, emulsionanti, bagnanti) oppure in base alla carica elettrica delle loro molecole (cationici, ionici, non ionici, anfoteri). La presenza del tensioattivo in una schiuma ne migliora la stabilità e la durata nel tempo, al contrario, in assenza di tensioattivo, le bolle d'aria tenderanno a collassare quasi istantaneamente [11]. Le schiume, infatti, sono dei sistemi termodinamicamente instabili, come d'altronde quasi tutti i sistemi costituiti da due o più fasi tra loro immiscibili, in cui vi è la tendenza alla riduzione dell'area interfacciale totale tra le fasi.

Sebbene le schiume presentano tale tendenza al collasso, esiste una particolare tipologia di schiuma, detta permanente o metastabile, la cui durata può variare da alcune decine di minuti ad alcuni giorni; questa è la tipologia di schiuma adatta per un calcestruzzo schiumato. Al contrario, quando la durata della schiuma è di alcuni secondi, si parla di schiuma transitoria [11]. Il collasso della schiuma non è associato ad un'unica causa, ma esistono ben tre fattori principali correlati a tale fenomeno: il primo tra tutti,

che rappresenta inoltre la causa più destabilizzante, è il drenaggio idrodinamico (supportato dalla forza di gravità) del liquido tra le bolle, che porta ad un repentino collasso della schiuma; altro meccanismo fisico è la diffusione di gas da una particella ad un'altra, fenomeno correlato alla diversa dimensione delle bolle d'aria che pertanto saranno caratterizzate da una differente pressione interna e questo comporta la diffusione del gas da una bolla piccola (e quindi con maggiore pressione interna) ad una bolla più grande (con minore pressione interna) oppure nella fase gassosa che circonda la schiuma; ultimo meccanismo è quello della coalescenza delle bolle per via della rottura del film lamellare tra le bolle adiacenti dovuto al flusso capillare [12], in cui più bolle quindi si fondono per formare un'unica bolla più grande [11]. Quest'ultimo fenomeno risulta essere un fenomeno spontaneo, in quanto genera una riduzione dell'energia totale del sistema; il volume della bolla risultante sarà pari alla somma delle bolle che hanno contribuito alla sua formazione, mentre l'estensione della superfici della bolla risultante sarà molto inferiore rispetto alla somma delle superfici delle singole bolle di partenza [11].

Durante la vita delle schiume vi è una transizione dovuta al drenaggio; le schiume, infatti, sono inizialmente schiume umide e successivamente, per effetto del drenaggio, diventano schiume secche. Una schiuma appena realizzata è caratterizzata dall'avere delle lamelle spesse e delle bolle di forma sferica ma tale condizione non rimane invariata nel tempo; le schiume pertanto, per via del drenaggio, saranno soggette ad un assottigliamento delle lamelle e questo provoca un'accelerazione della crescita delle bolle, facendo in tal modo diminuire la densità della schiuma, e il raggiungimento quindi della condizione di schiuma secca che risulta caratterizzata da bolle con forma non più sferica ma poliedrica [11].

In conclusione, per ottenere una schiuma stabile, è di fondamentale importanza scegliere la corretta tipologia di agente schiumogeno, adottando un'adeguata concentrazione; tutto ciò, infatti, oltre alle interazioni che l'agente schiumogeno provoca, influisce sulle caratteristiche del film interposto tra le differenti fasi, incidendo pertanto sulla stabilità della schiuma correlata al drenaggio. Ai fini di un'adeguata stabilità, il film dovrebbe possedere un'elevata viscoelasticità e un adeguato spessore, caratteristiche tra loro correlate. È possibile ottenere una maggiore viscosità aggiungendo una soluzione viscosa nella fase liquida e questo permette di ottenere una sistema caratterizzato da una maggiore forza di confinamento e quindi bolle di dimensione minore (maggiore pressione interna) [11].

#### 2.2.2.3 La stabilità della schiuma nei calcestruzzi schiumati

Come già riportato precedentemente, la caratteristica peculiare di un calcestruzzo schiumato, che lo contraddistingue da un calcestruzzo tradizionale, è proprio la presenza di schiuma introdotta nella miscela di base. Tale schiuma, una volta introdotta nella miscela, può essere soggetta a fenomeni di instabilità modificando in tal modo le

caratteristiche del calcestruzzo e compromettendone quindi le prestazioni; risulta pertanto importante, ai fini di una corretta comprensione del comportamento di tale categoria di calcestruzzi, approfondire i concetti che stanno alla base di tale fenomeno. Quando si parla di instabilità del calcestruzzo schiumato ci si riferisce alla segregazione del calcestruzzo, ovvero la separazione tra la fase solida e la fase gassosa e quando ciò accade è possibile che venga totalmente persa la fase gassosa all'interno del calcestruzzo, rimanendo in tal modo la sola miscela base [13]. La suscettibilità di un calcestruzzo schiumato all'instabilità incrementa notevolmente per le densità ultra basse e quindi inferiori a 500 kg/m3 e, passando a miscele con densità ancora inferiori (≅ 300 kg/m3), risulta piuttosto difficile ottenere delle miscele stabili. L'instabilità può presentarsi istantaneamente oppure a distanza di minuti o addirittura ore dalla preparazione della miscela; questo dipende dalla densità della miscela. Difatti, al diminuire della densità del calcestruzzo schiumato aumenta la dimensione media delle bolle nella miscela e diminuisce il tempo in cui si verifica l'instabilità [13]. Inoltre, bisogna precisare che, una volta che la schiuma viene introdotta nella miscela, subisce una variazione in termini di dimensione delle bolle ed anche una variazione della pressione interna alle bolle in modo tale che venga mantenuta una condizione di equilibrio con la matrice cementizia circostante; risulta però difficile analizzare se le bolle d'aria presenti nel calcestruzzo schiumato presentino una dimensione maggiore o minore rispetto alla dimensione che avevano prima di essere introdotti nella miscela di calcestruzzo e quindi rispetto alle bolle della schiuma bagnata. In ogni caso, una volta introdotta la schiuma nella miscela, la dimensione delle bolle d'aria sarà proporzionale alla densità plastica della miscela fresca di calcestruzzo schiumato [13].

Spostando l'attenzione su una singola bolla all'interno del calcestruzzo schiumato, come mostrato in Figura 2.4, si nota come essa è soggetta ad una molteplicità di forze che, in condizioni di stabilità, dovranno tutte equilibrarsi [13]:



Figura 2.4: Schematizzazione bidimensionale che mostra le forze agenti su una bolla all'interno di una miscela fresca di calcestruzzo schiumato [13]

La Figura 2.4 mostra tutte le forze che agiscono su ogni singola bolla incorporata nel calcestruzzo schiumato, essa risulta quindi soggetta ad una:

- Forza di confinamento F<sub>c</sub>, dipendente dal tipo di cemento utilizzato, dall'uso di diversi riempitivi tra cui sabbia o cenere volante grossolana ma soprattutto dalla densità plastica dell'impasto fresco;
- Forza di galleggiamento F<sub>b</sub>;
- Forza di drenaggio F<sub>d</sub>;
- Tensione superficiale delle bolle per effetto del tensioattivo Fst;
- Pressione interna della bolla P<sub>i</sub>;

Quando tutte queste forze sono bilanciate la bolla raggiunge una condizione di equilibrio stabile.

Per ottenere densità ultra basse ( $\leq$  500 kg/m<sup>3</sup>) viene ridotto il quantitativo di acqua e il contenuto di cemento nella miscela, questo porta ad una riduzione della tensione di snervamento che si traduce in una forza di confinamento Fc nettamente più bassa; in tal modo la miscela avrà al suo interno bolle più ravvicinate e con dimensioni maggiori. Per limitare questa problematica è possibile adottare dei materiali cementizi più fini, come ad esempio la cenere volante; questo permette di raggiungere valori più elevati della forza di confinamento e garantire un maggiore imballaggio tra le particelle, rendendo le bolle, a parità di densità plastica, più piccole [13].

Quello che si nota nelle miscele instabili è che, ad un certo punto, le bolle aumentano di dimensione ed iniziano a galleggiare, separandosi quindi dalla miscela. Come mostrato nella Figura 2.5, le miscele di calcestruzzo schiumato con densità piuttosto

## basse hanno una maggior tendenza ad avere delle bolle che incrementano la loro dimensione [13]:



Figura 2.5: Modifica della dimensione delle bolle quando la schiuma viene introdotta nella miscela base [13]

Come si evince dalla Figura 2.5, una volta introdotta la schiuma nella miscela base, la dimensione delle bolle è fortemente influenzata dalla densità della miscela; si nota infatti che, in un calcestruzzo schiumato con densità circa pari a 600 kg/m<sup>3</sup>, le bolle al suo interno non tendono ad aumentare più di tanto la loro dimensione e questo è dovuto all'elevata forza di confinamento, per via di una densità non troppo bassa cui esse sono soggette. Quindi all'aumentare della densità si ottiene una miscela via via più stabile. Al contrario, considerando invece un calcestruzzo schiumato con densità ultra bassa (circa 300 kg/m<sup>3</sup>), le bolle tenderanno ad aumentare la loro dimensione in quando soggette ad una forza di confinamento inferiore, per via della densità troppo bassa, e quindi, ad una maggiore differenza di pressione tra l'interno e l'esterno delle bolle [13].

In tale schematizzazione viene però riportato uno schema ideale in cui le bolle hanno tutte la stessa dimensione, in realtà le bolle sono caratterizzate dall'avere una dimensione variabile all'interno della miscela e questo porta ad avere un gradiente di pressione interno che può portare ad una diffusione del gas dalle bolle più piccole a quelle più grandi, come viene riportato nella seguente Figura 2.6 [13]:



Figura 2.6: Illustrazione schematica della diffusione di gas tra le bolle [13]

La Figura 2.6 mostra la diffusione del gas dalle particelle più piccole a quelle più grandi, dovuto al gradiente di pressione interno che aumenta sempre più all'avanzare del fenomeno e questo provoca un ulteriore aumento delle dimensioni delle bolle più grandi e quindi della forza di galleggiamento cui esse sono soggette. Al diminuire della densità delle miscele di calcestruzzo schiumato tale fenomeno avviene più velocemente e con maggior facilità per via delle pareti più sottili e della minore distanza tra le bolle. Quando la forza di galleggiamento F<sub>b</sub> rimane inferiore alla forza di confinamento F<sub>c</sub> la miscela risulta stabile; quando invece il fenomeno va avanti fin quando le bolle non raggiungono una dimensione tale da avere una forza di galleggiamento F<sub>b</sub> che diventa più grande della forza di confinamento F<sub>c</sub> e che quindi porta le bolle a galleggiare fino in superficie, per poi farle scoppiare e rilasciare il gas nell'ambiente circostante, allora la miscela sarà instabile con conseguente separazione di fase e la schiuma risulterà totalmente collassata.

È necessario inoltre aggiungere che tale processo avviene fin quando la miscela non indurisce oppure non viene raggiunto l'equilibrio; infatti, una volta indurita la miscela, le bolle non saranno più soggette ad alcuna variazione di dimensione [13].

# 2.3 Le proprietà del calcestruzzo schiumato sia allo stato fresco che allo stato indurito

#### 2.3.1 Le caratteristiche della miscela allo stato fresco

La caratterizzazione della miscela allo stato fresco risulta sicuramente una fase molto importante per comprendere il comportamento della miscela sia a breve termine, che a lungo termine; infatti, tali proprietà possono influenzare le caratteristiche della miscela una volta indurita. In tale fase, vengono sicuramente valutate la consistenza, e quindi la lavorabilità, così come la densità.

La prova che solitamente viene utilizzata per valutare la consistenza è quella del cono di Abrams. La classica prova consiste nell'introdurre la miscela fresca all'interno del cono, a sua volta poggiato su una base di appoggio, fino a riempirlo; successivamente, tale cono verrà sollevato, cercando di non agitare più di tanto il materiale in modo da non influenzare il contenuto d'aria all'interno, e il materiale subirà un abbassamento, il cosiddetto slump, per il solo effetto della gravità e quindi del peso proprio. L'abbassamento viene poi misurato mediante l'ausilio di un'asta graduata. In funzione dell'entità dello slump e mediante l'ausilio di tabelle è possibile associare una classe di consistenza al calcestruzzo. Oltre allo slump viene anche valutato lo spread flow, ovvero la diffusione del flusso una volta rimosso il cono. Viene espresso in percentuale rispetto al diametro base del cono. Un altro test importante, per la valutazione della fluidità della miscela è la prova del cono di Marsh. In tale prova si valuta il tempo, detto tempo di flusso, che impiega la miscela a riempire un recipiente di 1 litro. La miscela viene versata nel contenitore mediante l'utilizzo di un cono standardizzato, al quale viene installato un orifizio avente una certa dimensione prefissata. Il tempo di flusso permette di valutare la viscosità plastica della miscela.

La consistenza dipende da molteplici fattori, tra cui il rapporto acqua/ solido e il contenuto di superfluidificante. Pertanto, due strategie per migliorare la consistenza della miscela, risultano essere l'aumento del rapporto acqua/ solido oppure l'aggiunta di superfluidicante. Bisogna anche precisare che, un contenuto eccessivo di acqua potrebbe portare alla segregazione del calcestruzzo schiumato durante il getto condizionandone la lavorabilità; viene quindi raccomandato di mantenere il valore del rapporto acqua/cemento quanto più basso possibile [7].

Qualora nella miscela fosse introdotta della cenere volante, fungendo quindi da riempitivo, è necessario valutare l'influenza sulla consistenza del rapporto riempitivo/ cemento. La consistenza della miscela fresca sicuramente migliora se, a parità del rapporto riempitivo/ cemento, viene incrementato il rapporto acqua/ cemento; inoltre, per quanto riguarda la miscela base, mantenendo un rapporto acqua/ cemento costante ed aumentando la quantità di riempitivo a parità di cemento, si è notata una miglior consistenza. Questo è dovuto alla riduzione dell'area superficiale dei solidi presenti nella miscela. Prendendo invece in considerazione la miscela di calcestruzzo schiumato, si può affermare che risulta indipendente dal rapporto riempitivo/ cemento,

in quanto la riduzione della consistenza dovuta all'aggiunta della schiuma rende trascurabile quantitativamente l'effetto migliorativo dovuto alla riduzione dell'area superficiale delle particelle solide [14].

Quindi la schiuma influenza negativamente la consistenza della miscela e ciò è dovuto, probabilmente, al ridotto peso proprio e all'adesione tra le bolle d'aria e le particelle solide che porta a far aumentare la rigidità dell'impasto [14]. È stato inoltre notato che, incrementando il rapporto acqua/ cemento, seppur riducendo il contenuto di schiuma, la consistenza tendeva lo stesso a diminuire, aumentandone di fatto la densità plastica [7].

È possibile mettere in luce l'influenza della schiuma nella consistenza della miscela mediante il seguente grafico [15]:



Figura 2.7: Influenza del quantitativo di schiuma e della densità nel flusso [15]

Nella Figura 2.7: Influenza del quantitativo di schiuma e della densità nel flusso viene riportata l'entità del flusso delle varie miscele confrontando la situazione prima dell'introduzione della schiuma nelle miscele e dopo. Focalizzando l'attenzione su una singola miscela si nota che, una volta introdotta la schiuma, il flusso si riduce. Viene anche messo in relazione il flusso con la densità di progetto e si può notare come il valore del flusso si riduce al diminuire della densità, e quindi aumentando il volume di schiuma. Si osserva la massima riduzione del flusso in corrispondenza della densità di progetto minima; questo può essere dovuto al fatto che, a densità inferiori, sicuramente il contenuto di schiuma sarà maggiore rispetto alla quantità di pasta cementizia, comportando il tal modo una maggiore adesione tra le bolle d'aria e le particelle ed incrementando quindi la rigidità della pasta [15].

Focalizzando l'attenzione nelle miscele in cui è stata aggiunta la schiuma e prendendo in considerazione una determinata densità, quello che si osserva è un valore maggiore del flusso nelle miscele in cui è presente la cenere volante; ciò è dovuto al basso peso specifico della cenere volante rispetto alla sabbia che comporta un minore volume di schiuma nella miscela.

Nella Figura 2.8: relazione tra flusso, volume di schiuma, e tipo di riempitivo viene invece riportata la relazione tra il flusso, il quantitativo di schiuma e il tipo di riempitivo [15]:



Figura 2.8: relazione tra flusso, volume di schiuma, e tipo di riempitivo [15]

Come è possibile notare dal grafico, per un dato volume di schiuma, il flusso non risulta essere influenzato dal tipo di riempitivo.

Risulta anche impattante per la consistenza della miscela la densità dell'aggregato; infatti, l'utilizzo di un aggregato avente una bassa densità porta ad ottenere una miscela con una ridotta consistenza [7].

Alla base di tutto ciò per ottenere le prestazioni desiderate occorre quindi progettare opportunamente la miscela considerando l'influenza che può portare ogni singolo suo componente in relazione anche alla quantità introdotta.

Per valutare se la consistenza di un calcestruzzo schiumato possa essere considerata adeguata esistono svariati criteri; i ricercatori E. K. Kunhanandan Nambiar e Ramamurthy K [14], hanno riportato in un loro studio che la consistenza di un calcestruzzo schiumato può essere considerata accettabile se lo spread flow risulta compreso tra il 40 e il 60 % e il tempo di flusso inferiore a 20 secondi, realizzando in tal modo una miscela autocompattante che non necessita di alcuna vibrazione esterna, e con un'adeguata lavorabilità e stabilità.

Per garantire una buona stabilità alla miscela, oltre alla consistenza che può sicuramente condizionarla, essa è influenzata anche dall'aggiunta degli additivi minerali e dall'introduzione del superfluidificante, come anche dalla quantità di tensioattivo utilizzata. Infatti, introdurre una quantità eccessiva di tensioattivo può portare ad un peggioramento della stabilità.

L'utilizzo di superfluidificante nella miscela permette di raggiungere rapporti acqua/cemento davvero ridotti, raggiungendo valori inferiori a 0.3 e migliorando la stabilità del 43% [7].

Quando viene aggiunto un superfluidificante all'interno della miscela, o in generale un additivo chimico, è importante valutare la sua compatibilità con gli altri componenti presenti nella miscela, in particolare, nel caso di calcestruzzo schiumato, con la tipologia di surfattante utilizzato.

Qualora vi fosse incompatibilità e mancanza di interazione tra il superfluidificante e il surfattante, si andrebbe in contro alla segregazione del calcestruzzo schiumato. Quindi bisogna prestare molta attenzione alle caratteristiche del superfluidificante utilizzato e alla scelta dell'opportuno tensioattivo. Tale incompatibilità si è vista maggiormente con tensioattivi di natura proteica, che hanno portato alla segregazione della miscela di calcestruzzo schiumato [7].

Quindi, per progettare una miscela che possa godere di una buona stabilità, il primo passo è sicuramente quello di utilizzare un metodo corretto di mix design. Per verificare se la procedura di calcolo adottata è stata quella corretta, è possibile andare a confrontare che la differenza tra la densità plastica di progetto e la densità plastica effettivamente raggiunta sia compresa tra il 2 ed il 7% [7]. Esistono anche dei test per andare a valutare la stabilità della miscela, come per esempio quello che prevede un confronto tra il valore del rapporto acqua/cemento calcolato con il valore reale: affinché vi sia stabilità, tale differenza deve risultare intorno al 2%. Un ulteriore test per valutare la stabilità è quello proposto da Kunhanandan Nambiar et al. [7] il quale prevede di confrontare il valore della densità target con il valore della densità del calcestruzzo schiumato fresco valutata mediante l'utilizzo di un contenitore standard. Affinché vi sia stabilita, tale rapporto dovrà essere quanto più possibile vicino all'unità. Nella Figura 2.9: Relazione tra il rapporto di densità (densità fresca misurata e densità di progetto) con il rapporto acqua/solidi e il tipo di riempitivo viene riportata la relazione tra il rapporto di densità (densità misurata fresca/densità di progetto) in funzione del rapporto acqua/solidi e del tipo di riempitivo [15]:



Figura 2.9: Relazione tra il rapporto di densità (densità fresca misurata e densità di progetto) con il rapporto acqua/solidi e il tipo di riempitivo [15]

Come è possibile riscontrare dalla Figura 2.9, i valori più piccoli del rapporto di densità, per ogni tipo di miscela, si attestano ad un valore circa uguale all'unità, che rappresentano la condizione di maggior stabilità. Per un certo tipo di miscela, e di conseguenza una determinata tipologia di riempitivo, andando a considerare rapporti acqua/solidi inferiori, si osserva un aumento del rapporto di densità e quindi della densità fresca misurata; un basso valore del rapporto acqua/solidi comporta infatti un incremento della rigidezza della miscela che risulterà quindi difficile da miscelare nel modo corretto, comportando la rottura delle bolle e di conseguenza un aumento della densità fresca. Al contrario, considerando rapporti acqua/solidi più elevati, il maggior contenuto d'acqua porta ad avere una miscela che presenta difficoltà nel trattenere le bolle e questo porta alla segregazione della schiuma e della miscela stessa, con conseguente aumento della densità fresca [15]. Pertanto, viene in tal modo individuata l'unica condizione di consistenza che permette di ottenere un rapporto di densità circa uguale all'unità [15]; tale condizione, per la quale nessuna segregazione e bleeding si presentano, rappresenta la stabilità della miscela [16].

Il rapporto acqua/solidi gioca quindi un ruolo importante nella stabilità della miscela, e per determinarne il valore è necessario tenere in considerazione il quantitativo di schiuma che verrà introdotto nella miscela e, in caso di aggiunta di riempitivo, considerare anche il rapporto tra la quantità di riempitivo e quella del cemento, come anche la percentuale di sostituzione.

Nella Figura 2.10: Influenza del rapporto riempitivo/cemento e del quantitativo di riempitivo nel rapporto acqua/solidi viene individuato un range di valori del rapporto acqua/solidi per un dato quantitativo di schiuma (in questo caso pari al 10%), in funzione del rapporto riempitivo/cemento e della percentuale di sostituzione alla sabbia, che permettono di ottenere una miscela stabile:



Figura 2.10: Influenza del rapporto riempitivo/cemento e del quantitativo di riempitivo nel rapporto acqua/solidi [14]

Come è possibile notare dalla Figura 2.10, per un dato rapporto riempitivo/cemento e per un prefissato valore di schiuma, il rapporto acqua/solidi richiesto aumenta all'aumentare della quantità di riempitivo utilizzata. Il riempitivo introdotto in questo caso specifico è la cenere volante, e avendo una dimensione media delle particelle inferiore a quella della sabbia porta ad un aumento dell'area della superficie specifica e questo richiede un maggior contenuto d'acqua [14]. È questo il motivo per cui il valore del rapporto acqua/solidi richiesto è maggiore.

Naturalmente, un'eccessiva riduzione del rapporto acqua/solidi va a compromettere la lavorabilità dell'impasto; si ritiene quindi opportuno determinare un valore del rapporto acqua/solidi che soddisfi sia il requisito di stabilità della miscela ma che garantisca anche un'adeguata consistenza.

Un valore dello spread pari al 45% permette di ottenere un impasto che sia stabile ma che abbia allo stesso tempo una buona consistenza [14].

#### 2.3.2 Le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo schiumato

L'introduzione di bolle d'aria all'interno della miscela del calcestruzzo schiumato, è sicuramente una delle caratteristiche principali di questa tipologia di materiale che lo contraddistingue, dal calcestruzzo tradizionale; questo permette di ottenere un calcestruzzo che presenta una serie di vantaggi, tra cui buon isolamento termico e acustico, buona resistenza al fuoco, leggerezza, economicità, ma allo stesso tempo discrete proprietà meccaniche, se paragonate a quelle raggiunte da un calcestruzzo

tradizionale. Questo è dovuto sicuramente alle basse densità, comprese nell'intervallo tra 280 kg/m3 e 1800 kg/m3 [7], che caratterizzano tale materiale; infatti, la densità condiziona direttamente la resistenza a compressione del materiale e bassi valori di densità influiscono negativamente [7], impedendo in tal modo, nella maggior parte dei casi, di poter utilizzare tale materiale per applicazioni strutturali.

Bisogna inoltre aggiungere che, oltre la densità, ci sono molti altri fattori che condizionano la resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato, tra questi certamente vi è l'influenza dell'agente schiumogeno utilizzato per generare la schiuma. L'entità dei vuoti generati all'interno della miscela indurita è funzione del volume di agente schiumogeno utilizzato e, una quantità eccessiva, porta ad un elevato contenuto di aria all'interno della miscela, con conseguente riduzione della densità, e quindi, della resistenza a compressione [7].

Altro fattore che influenza la resistenza a compressione è la quantità di sabbia introdotta nella miscela in relazione alla quantità di legante; solitamente in Europa vengono utilizzati rapporti acqua/legante da 1:1 a 4:1, ma è stato anche riscontrato che, per bassi valori del rapporto acqua/cemento, precisamente compresi tra 1:1 e 2:1, l'influenza del contenuto di sabbia risulta essere trascurabile. Gioca un ruolo importante anche la tipologia di sabbia utilizzata. Nella Figura 2.11 viene riportata l'influenza della dimensione della sabbia utilizzata nella resistenza a compressione al variare della densità:



Figura 2.11: Relazione tra densità e resistenza per miscele con sabbia fine e grossolana [15]

Come è possibile notare dalla Figura 2.11, le maggiori resistenze a compressione sono associate alle miscele con sabbia fine e la differenza di resistenza è sempre più marcata all'aumentare della densità. La dimensione delle particelle di sabbia influisce

sulla dimensione e distribuzione dei vuoti all'interno della miscela; pertanto, è stato riscontrato che l'utilizzo di sabbia fine porta ad una distribuzione più uniforme delle bolle d'aria ed anche ad una dimensione media inferiore, e questo sicuramente influisce positivamente sulla resistenza a compressione, permettendo quindi, di raggiungere valori di resistenza più elevati. D'altro canto, la presenza di sabbia grossolana porta alla formazione di pori aventi forma e dimensioni differenti, con conseguente tendenza al raggruppamento, e quindi, alla formazione di bolle sempre più grandi e irregolari, e a valori di resistenza a compressione inferiori [15].

Infatti, per aumentare la resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato è necessario evitare all'interno della miscela la presenza di macrobolle, ovvero bolle di grandi dimensioni, e quindi, cercare di ottenere una miscela che presenti una distribuzione delle bolle, in termini di dimensioni, quanto più uniforme e omogenea possibile e allo stesso tempo caratterizzata da bolle di dimensioni ridotte.

Altro fattore che influenza la resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato è sicuramente il rapporto acqua/cemento; è possibile incrementare la resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato adottando valori quanto più bassi possibili di tale rapporto, cercando sempre di mantenere un'adeguata lavorabilità [6]. Per calcestruzzi schiumati ad alta resistenza vengono adottati rapporti acqua/cemento compresi tra 0.17 e 0.19 [7].

Per la valutazione della resistenza a compressione di un calcestruzzo schiumato, prima che venga testato un qualsiasi provino, è necessario che il calcestruzzo schiumato venga fatto stagionare nel modo corretto; difatti, la stagionatura del calcestruzzo ne condiziona lo sviluppo della resistenza e quindi il valore di resistenza massima raggiunta una volta indurito. Secondo l'ASTM C 796, i campioni di calcestruzzo schiumato che andranno testati per valutare la resistenza a compressione, dopo il confezionamento, è necessario che vengano conservati all'interno di una stanza in condizioni di umidità controllata, precisamente ad un valore pari al 100% di umidità relativa (RH) e, prima di sottoporli al test, essiccati in forno a 60 °C per 72 h [7].

Il calcestruzzo tradizionale è caratterizzato dall'avere bassi valori di resistenza a trazione se confrontati con i valori di resistenza a compressione; i valori dei rapporti tra la resistenza a trazione e la resistenza a compressione sono compresi tra 0.08 e 0.11. Stessa cosa viene riscontrata nei calcestruzzi schiumati dove tale differenza risulta essere meno accentuata; difatti, i valori dei rapporti tra la resistenza a trazione e la resistenza, nei calcestruzzi schiumati, si attestano nel seguente intervallo  $0.2 \div 0.4$  [7]. Si può inoltre aggiungere che, in generale, un calcestruzzo schiumato presenta una resistenza a trazione inferiore rispetto quella raggiunta da un calcestruzzo tradizionale.

Una delle possibili formule empiriche che possono essere utilizzate per calcolare la resistenza a trazione, partendo dal valore di resistenza a compressione, è la seguente [7]:

$$f_c = 0.23 f_c^{0.26} \tag{7}$$

dove fc è il valore della resistenza a compressione a 28 giorni,  $\frac{N}{mm^2}$ .

Sicuramente i fattori che influenzano la resistenza a compressione influiscono anche sulla resistenza a trazione e flessione; tra questi il contenuto d'acqua che, se in quantità eccessiva, porta ad una riduzione della resistenza a flessione per via delle inferiori densità che si andrebbero ad ottenere.

La resistenza a trazione di un calcestruzzo schiumato può essere migliorata e questo risulta possibile mediante l'aggiunta di minerali all'interno della miscela, oppure aggiungendo fibre di polipropilene, ma questo verrà approfondito nei successivi paragrafi in cui verrà riportato come migliorare le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo schiumato, rendendolo pertanto un materiale adatto per fini strutturali.

Il calcestruzzo schiumato presenta modesti valori del modulo elastico se confrontato con i moduli elastici dei calcestruzzi tradizionali; si parla di una riduzione pari circa al 75% [7].

Come viene messo in evidenza nella seguente tabella presa dallo studio svolto da K.C. Brady et al. [17], la densità del calcestruzzo schiumato è uno dei fattori che influenza il modulo elastico:

Dry density	7-day compressive strength	Thermal conductivity	Modulus of elasticity	Drying shrinkage
kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>	W/mK	kN/mm <sup>2</sup>	%
400	0.5 - 1.0	0.10	0.8 - 1.0	0.30 - 0.35
600	1.0 - 1.5	0.08 - 0.11	1.0 - 1.5	0.22 - 0.25
800	1.5 - 2.0	0.17 - 0.23	2.0 - 2.5	0.20 - 0.22
1000	2.5 - 3.0	0.23 - 0.30	2.5 - 3.0	0.18 - 0.15
1200	4.5 – 5.5	0.38 - 0.42	3.5 - 4.0	0.09 - 0.11
1400	6.0 - 8.0	0.50 - 0.55	5.0 - 6.0	0.07 - 0.09
1600	7.5 - 10.0	0.62 - 0.66	10.0 - 12.0	0.06 - 0.07

Figura 2.12: proprietà di un calcestruzzo schiumato indurito in relazione alla densità [17]

dalla Figura 2.12 è possibile notare, al variare della densità, i modesti valori del modulo elastico del calcestruzzo schiumato, che risultano compresi nel seguente intervallo  $0.8 \div 12 \frac{kN}{mm^2}$ , per densità che variano tra 400 e  $1600 \frac{kg}{m^3}$ .

Il modulo elastico viene inoltre influenzato dalla tipologia e dalla quantità di aggregato fine introdotto. Nella seguente figura vengono mostrate miscele che presentano come aggregato fine la sabbia e altre miscele in cui la sabbia è stata invece sostituita da PFA (cenere di combustibile polverizzata); si nota che, a parità di

resistenza, il modulo elastico risulta inferiore nel caso delle miscele con PFA e questo è dovuto probabilmente al miglior effetto di mutuo incastro presente nelle particelle di sabbia:



Figura 2.13: Valori del modulo elastico a 28 giorni di miscele di calcestruzzo schiumato con differente aggregato fine [17]

#### 2.3.3 Durabilità del calcestruzzo schiumato

Il calcestruzzo può deteriorarsi nel tempo e questo può essere dovuto a molteplici fattori che riguardano sia le proprietà stesse del calcestruzzo, sia l'ambiente in cui la struttura verrà realizzata. Risulta quindi importante valutarne la durabilità, ovvero la capacità del calcestruzzo di resistere a tali fattori che possono provocarne il suo deterioramento nel tempo. Verrà di seguito riportata l'influenza della permeabilità e dell'ambiente aggressivo.

#### 2.3.3.1 Permeabilità

La permeabilità è l'attitudine di un materiale nel lasciarsi attraversare da un fluido. Essa in genere viene determinata mediante la valutazione del flusso d'acqua in pressione con cui viene fatto attraversare un materiale poroso saturo. Nel calcestruzzo schiumato, la facilità nell'essere attraversato da un fluido viene valutata mediante la misurazione dell'assorbimento d'acqua e la permeabilità al vapore acqueo.

Nello studio condotto dai ricercatori E.PKearsleya P.JWainwright [18], in cui sono state realizzate delle miscele di calcestruzzo schiumato sostituendo il 75% in peso del cemento con cenere volante, si è visto che a parità di rapporto acqua/legante il

calcestruzzo schiumato ha presentato un assorbimento d'acqua maggiore rispetto ad un calcestruzzo tradizionale, pari quasi al doppio. Il contenuto di acqua assorbita dal calcestruzzo schiumato è risultato poco influenzato dal quantitativo di aria inglobata e questo vuol dire che non tutti i vuoti si riempiono di acqua. Inoltre, l'assorbimento d'acqua è risultato indipendente anche dal tipo e dal quantitativo di cenere volante introdotta nella miscela; questo sicuramente è dovuto al rapporto acqua/legante che è stato mantenuto costante e che quindi ha compensato un'eventuale riduzione dell'assorbimento d'acqua dovuto all'introduzione della cenere volante [18].

La determinazione della permeabilità è importante per la valutazione della qualità del calcestruzzo nel tempo, in quanto, una ridotta permeabilità, fornisce una maggiore protezione al calcestruzzo dall'ingresso, dall'ambiente esterno, di agenti potenzialmente aggressivi che possono in tal modo portare al deterioramento del calcestruzzo. Non bisogna confondere però la permeabilità con la porosità; infatti, la porosità mette in relazione la quantità di vuoti, in termini di volume, all'interno del materiale, rispetto al volume totale e non dà alcuna informazione sul trasporto dei fluidi all'interno di esso. Per avere tale informazione, è necessario, oltre a determinare la quantità dei vuoti presenti, valutare anche se tali pori risultano essere interconnessi tra di loro oppure no, in tal modo potremo distinguere la porosità continua dalla porosità discontinua. Un materiale con un elevata permeabilità è un materiale in cui i vuoti presenti al suo interno sono interconnessi e questo favorisce il trasporto dei fluidi compromettendo in tal modo la qualità del calcestruzzo nel tempo e quindi la sua durabilità.

La permeabilità può essere determinata mediante la seguente formula empirica [18]:

$$k_d = \frac{K\Delta HA}{Lv} \tag{8}$$

Dove:

K = coefficiente di permeabilità;

 $\Delta H$  = gradiente di pressione;

A = area superficiale;

L = spessore del solido attraversato dal fluido;

u = viscosità del fluido

La permeabilità può anche essere influenzata dalla presenza o meno di aggregato nella miscela; in uno studio condotto dal ricercatore Nyame su delle malte cementizie, si è scoperto che riducendo la porosità per via dell'inclusione di aggregati nel materiale, la permeabilità diminuiva [7].

La permeabilità può essere influenzata da molteplici fattori, tra questi, come accennato prima, la presenza o meno di additivi minerali, come ad esempio la cenere volante; essa, a causa dell'effetto riempitivo e del suo comportamento pozzolanico, modifica la struttura dei pori e quindi la permeabilità [7].

Nella Figura 2.14, viene mostrato l'effetto della cenere volante sulla permeabilità al vapore acqueo, sia del calcestruzzo tradizionale, sia del calcestruzzo schiumato, analizzando inoltre come esso varia al variare del rapporto cenere/cemento:



Figura 2.14: Effetto della cenere volante nella permeabilità al vapore acqueo [18]

Come viene messo in evidenza dai risultati della Figura 2.14, nei calcestruzzi schiumati, la permeabilità al vapore acqueo aumenta all'aumentare del rapporto cenere/cemento, e tale incremento è più accentuato alle densità più basse [18].

È anche interessante notare come la densità influenza l'assorbimento d'acqua e quindi la permeabilità; questo viene messo in luce nella seguente figura:



Figura 2.15: Effetto della densità secca nella percentuale di assorbimento dell'acqua [18]

La Figura 2.15 mostra la relazione tra la densità secca e la percentuale di acqua assorbita, quindi l'aumento di massa dovuto all'assorbimento d'acqua per unità di massa secca, sia di miscele di calcestruzzo schiumato che di calcestruzzo tradizionale. Si nota come la percentuale di acqua assorbita varia in funzione della densità in modo pressoché lineare, con le miscele a minore densità che assorbono una quantità maggiore di acqua. Possiamo quindi concludere che, in base ai risultati mostrati in Figura 2.15, le miscele a minore densità, poiché assorbono una quantità di acqua maggiore rispetto alle miscele con densità più elevate, saranno potenzialmente caratterizzate da una peggiore durabilità nel tempo.

Viene ottenuto un risultato leggermente diverso esprimendo l'assorbimento d'acqua in termini di aumento di massa per unità di volume:



Figura 2.16: Effetto della densità secca nell'assorbimento d'acqua [18]

Dalla Figura 2.16 si nota un quadro differente rispetto la figura precedente; mentre nei calcestruzzi tradizionali l'assorbimento d'acqua mostra una tendenza pressoché simile a quella mostrata nella figura precedente, nei calcestruzzi schiumati, le cui densità variano tra i 1000 kg/m<sup>3</sup> e i 1500 kg/m<sup>3</sup>, si nota che le miscele con densità inferiore, anche in questo caso assorbono una quantità maggiore di acqua rispetto alle miscele di calcestruzzo schiumato con densità maggiori, ma la differenza adesso è meno accentuata [18].

Come viene mostrato nella Figura 2.17, è stato riscontrato inoltre che la densità influenza anche la permeabilità al vapore acqueo:



Figura 2.17: Relazione la permeabilità al vapore acqueo e la densità secca [18]

Vi è inoltre una relazione tra la permeabilità al vapore acqueo e la porosità:



Figura 2.18: Relazione tra la permeabilità al vapore acqueo e la porosità [18]

Dalla Figura 2.18 è immediato notare l'aumento della permeabilità al vapore acqueo all'aumentare della porosità, con una tendenza piuttosto simile a quella riscontrata nella figura precedente in cui è stato analizzato l'effetto della densità. Si nota come tale tendenza è uguale sia per i calcestruzzi schiumati, sia per i calcestruzzi tradizionali, a differenza di quanto riscontrato per l'assorbimento d'acqua nella Figura 2.16, in cui la tendenza risultava differente tra le due categorie di calcestruzzo. Quindi, dai risultati mostrati nelle Figura 2.17 e Figura 2.18, si può concludere che, un aumento della porosità o una diminuzione della densità, e quindi in generale un aumento del contenuto dei vuoti all'interno del materiale, comporta un aumento della permeabilità al vapore acqueo.

A differenza di quanto riscontrato prima nel caso dell'assorbimento d'acqua, in cui la quantità di vuoti non influenzava più di tanto la quantità di acqua assorbita, e questo probabilmente poiché non tutti i vuoti si riempiono d'acqua, nel caso del vapore
acqueo, invece, si nota il contributo evidente della quantità di vuoti presente nel materiale al trasferimento del vapore acqueo attraverso il campione [18].

#### 2.3.3.2 Ambienti aggressivi

La durabilità del calcestruzzo schiumato può anche essere compromessa a seguito della presenza di agenti potenzialmente aggressivi presenti nell'ambiente esterno che, una volta entrati in contatto con i componenti del calcestruzzo, possono portare ad un suo deterioramento nel tempo.

Uno degli agenti aggressivi ricorrenti per il calcestruzzo schiumato è il solfato, il cui meccanismo di attacco risulta complesso e dipendente da molteplici fattori, tra cui: la permeabilità, la tipologia di cemento utilizzata, il rapporto acqua/cemento, le condizioni e la durata di esposizione, la concentrazione di solfati, l'inclusione di additivi minerali [7]. Considerando di mantenere invariate le condizioni ambientali, i due principali fattori che governano la resistenza del calcestruzzo all'attacco dei solfati sono: la chimica del cemento utilizzato e la permeabilità del calcestruzzo [19]. Per quel che riguarda la chimica del cemento è necessario attenzionare le quantità dei composti del calcestruzzo, ad esempio, gli standard americani suggeriscono per i calcestruzzi resistenti ai solfati, dei limiti sul quantitativo di  $C_3A$  e ( $2C_3A + C_4AF$ ), precisamente al 5% e al 25%. Bisogna però aggiungere che, nei cementi con una quantità ridotta dei composti  $C_3A \in C_4AF$ , vi è la tendenza ad avere dei rapporti  $C_3S/C_2S$  maggiori e, un aumento del contenuto di  $C_3S$  porta alla produzione di un quantitativo maggiore di idrossido di calcio (CH), in quanto l'idrossido di calcio prodotto dall'idratazione del  $C_3S$ è pari circa a 2,2 volte quello prodotto dall'idratazione del  $C_2S$  [19]. L'idrossido di calcio (CH) è la principale causa della formazione di gesso, che a sua volta è il primo step verso la formazione di ettringite, considerata la principale causa di deterioramento; quindi, un'elevata quantità di CH ha un'influenza negativa sul deterioramento del calcestruzzo.

Per ottenere un calcestruzzo con una ridotta permeabilità è necessario agire sul rapporto acqua/cemento, riducendolo. È stato inoltre scoperto che l'aggiunta di additivi minerali (sia cenere volante che pozzolana naturale) nelle miscele di cemento, oltre a ridurre la permeabilità, hanno anche permesso di ottenere una maggiore resistenza all'attacco dei solfati e questo è dovuto ad una riduzione del  $C_3A$ . Le reazioni pozzolaniche hanno inoltre permesso di ottenere un ridotto quantitativo di CH [19].

Un altro fenomeno di degrado del calcestruzzo piuttosto ricorrente è la carbonatazione, i cui effetti sono stati studiati anche per il calcestruzzo schiumato. In particolare, il calcestruzzo schiumato risulta essere particolarmente resistente sia agli attacchi dei solfati, sia alla carbonatazione e questo molto probabilmente è dovuto alla presenza delle bolle d'aria al suo interno che fungono da tampone, limitando in tal modo la penetrazione all'interno del materiale delle sostanze provenienti dall'esterno potenzialmente aggressive [7]. La carbonatazione è un fenomeno dovuto all'ingresso

dell'anidride carbonica ( $CO_2$ ) all'interno del materiale che, nel corso degli anni, reagisce con l'idrossido di calcio formando carbonato di calcio e acqua:

$$CO_2 + CaOH_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \tag{9}$$

La carbonatazione è un fenomeno di degrado del calcestruzzo che coinvolge principalmente i ferri di armatura, che possono subire una depassivazione per via dell'abbassamento del PH dovuto alla riduzione dell'idrossido di calcio coinvolto nella reazione con l'anidride carbonica; la presenza dell'idrossido di calcio permette difatti di avere un ambiente alcalino e quindi, protettivo per le armature. Nel calcestruzzo schiumato, la velocità con cui avviene il fenomeno della carbonatazione è influenzata dalla quantità di schiuma introdotta nella miscela, in quanto, una maggiore quantità di schiuma, per via della maggiore presenza di aria all'interno del materiale, porta ad ottenere un calcestruzzo schiumato con densità inferiori, e di conseguenza, un'accelerazione del fenomeno [7].

L'ingresso di cloruri rappresenta un'altra situazione critica per la durabilità del calcestruzzo; tale fenomeno riguarda principalmente le strutture marine a distanza ravvicinata dalla costa oppure a diretto contatto con l'acqua di mare e le strutture esposte ai sali disgelanti. Una volta che il fronte di penetrazione ha raggiunto le armature e la concentrazione dei cloruri raggiunge la concentrazione critica si innesca il fenomeno di corrosione delle armature, che quindi verranno compromesse. Si è visto che il calcestruzzo schiumato presenta una resistenza all'ingresso dei cloruri paragonabile a quella di un calcestruzzo tradizionale [7].

# 2.4 Ottimizzazione della miscela di calcestruzzo schiumato per fini strutturali

Il calcestruzzo schiumato, come già accennato prima, appartiene alla categoria dei calcestruzzi alleggeriti, con densità che variano circa tra i 400 e i 1600 kg/m<sup>3</sup>. Per tale ragione, i calcestruzzi schiumati sono caratterizzati da modesti valori di resistenza a compressione che non raggiungono i 25 Mpa e che risultano quindi molto inferiori ai valori di resistenza dei calcestruzzi tradizionali, motivo per il quale non sono adatti per un utilizzo strutturale. Bisogna però aggiungere che, grazie alle ricerche scientifiche degli ultimi anni, si è scoperto che apportando alcune modifiche alle convenzionali miscele di calcestruzzo schiumato, come ad esempio l'aggiunta di additivi minerali, è possibile migliorare le proprietà meccaniche di tale tipologia di calcestruzzo, raggiungendo resistenze che potrebbero pertanto permettere il suo utilizzo anche in ambito strutturale. Di seguito vengono riportati i vantaggi prestazionali ottenuti in termini di prestazioni meccaniche e durabilità.

#### 2.4.1 Proprietà meccaniche

#### 2.4.1.1 <u>Resistenza a compressione</u>

Per quanto riguarda un eventuale miglioramento delle proprietà meccaniche di un calcestruzzo schiumato, è necessario partire dalla struttura che caratterizza tale materiale. L'introduzione di schiuma nel materiale porta ad avere una miscela che presenterà al suo interno delle bolle d'aria, pertanto per valutare e quindi successivamente migliorare le proprietà meccaniche di tale materiale risulta necessario valutare le caratteristiche della struttura della pasta cementizia come anche della struttura del sistema di vuoti d'aria generato all'interno della miscela per via della schiuma introdotta.

Come è possibile riscontrare dagli studi presenti in letteratura, è frequente l'associazione della resistenza a compressione del materiale alla porosità, associando in tal modo le prestazioni meccaniche del calcestruzzo schiumato alla sola quantità di aria presente al suo interno. Gli studi più recenti sul calcestruzzo schiumato mostrano invece che la resistenza a compressione risulta essere influenzata non solo dalla quantità di aria inglobata al suo interno ma anche dalle caratteristiche delle singole bolle (forma e dimensione) e dalla distribuzione delle dimensioni delle bolle all'interno della miscela. Quest'ultima rappresenta una delle più importanti micro-proprietà che influenzano la resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato; è stato infatti riscontrato che, un calcestruzzo schiumato che presenta al suo interno una distribuzione delle dimensioni delle bolle più piccole, mostra valori di resistenza a compressione più elevati [20]. Esistono differenti strategie

per raggiungere una tale condizione, mediante ad esempio l'introduzione di additivi minerali o di superfluidificante all'interno della miscela.

Difatti, come viene riportato nello studio di M. R. Jones e A. McCarthy [21], l'aggiunta di cenere volante grossolana nella miscela di calcestruzzo schiumato, in sostituzione alla sabbia, ad un miglioramento della resistenza a compressione, come è possibile evincere dai seguenti risultati riportati in Figura 2.19:

Una prima soluzione che può portare all'aumento della resistenza a compressione riguarda l'aggiunta di additivi minerali nella miscela, come riportato nello studio di M. R. Jones e A. McCarthy [21], i cui risultati sono riportati nella seguente figura:



Figura 2.19: Effetto della cenere volante grossolana nella resistenza a compressione di un calcestruzzo schiumato [21]

In questo caso specifico è stata totalmente sostituita la sabbia con la cenere volante grossolana e il grafico mostra i valori di resistenza a compressione, ottenuti in funzione del tempo, alle varie densità target. Come è possibile notare, tutte le miscele con cenere volante hanno raggiunto, a distanza di 56 giorni di maturazione, un valore di resistenza di almeno 25 MPa e quindi sono tutti nettamente superiori ai valori di resistenza delle miscele contenenti sabbia che, in nessuna delle densità studiate, raggiunge i 30 MPa. All'aumentare della densità, si nota un sostanziale aumento della resistenza che, per densità target pari a 1800 kg/m<sup>3</sup> raggiunge quasi 60 MPa; valori di resistenza molto interessanti per un calcestruzzo schiumato. Si nota anche che lo sviluppo della resistenza nelle miscele con cenere volante grossolana è più lento, motivo per il quale viene consigliato come periodo di maturazione per la valutazione della resistenza 56 giorni piuttosto che 28 giorni.

L'aumento di resistenza dovuto all'introduzione di cenere volante grossolana in sostituzione alla sabbia può essere dovuto alla minore densità della cenere volante

grossolana rispetto alla sabbia e quindi una minore richiesta di aria all'interno della miscela per raggiungere la densità target prefissata [21].

Viene osservato un effetto positivo ancora più marcato nei confronti della resistenza a compressione, quando gli additivi minerali vengono utilizzati in combinazione piuttosto che singolarmente, come si evince dal seguente grafico:



Figura 2.20: Valori di resistenza a compressione a 28 giorni di miscele di calcestruzzo tradizionale e di calcestruzzo schiumato [20]

Nella seguente Figura 2.20, vengono correlati i valori di resistenza a compressione di differenti tipologie di miscela con le varie densità target. Viene innanzitutto fatta una distinzione tra calcestruzzi tradizionali (barre rosse) e calcestruzzi schiumati (barre blu) e, per entrambi, vengono analizzate differenti tipologie di miscela, studiando l'effetto di cenere volante, fumo di silice e superfluidificante introdotti sia singolarmente che in combinazione e valutando pertanto l'effetto apportato alla resistenza. Innanzitutto, dal grafico risalta, come già accennato precedentemente, la notevole differenza di resistenza tra i calcestruzzi tradizionali e i calcestruzzi schiumati ma, volendo prestare una maggiore attenzione alle sole miscele di calcestruzzo schiumato, si notano valori piuttosto differenti tra una miscela e l'altra. In questo caso sono state analizzate le seguenti densità target: 1300 kg/m<sup>3</sup> (FC3), 1600 kg/m<sup>3</sup> (FC6) e 1900 (FC9) kg/m<sup>3</sup> [20]. Le differenti lettere aggiunte alla sigla FC indicano precisamente: s (aggiunta di solo fumo di silice pari al 10% del peso del cemento), f (aggiunta di sola cenere volante in sostituzione al 20% in peso della sabbia), p (aggiunta di solo superfluidificante), a (combinazione di fumo di silice, cenere volante e superfluidificante). Si osserva che l'aggiunta di additivi porta ad un aumento della resistenza a compressione e i valori più elevati vengono raggiunti introducendo nella miscela il fumo di silice e combinandolo con la cenere volante e con il superfluidificante. Il superfluidificante, più di tutti gli altri, è l'additivo che porta ad una migliore struttura dei vuoti all'interno della miscela e tale effetto migliora se utilizzato in combinazione con gli altri additivi [20]. L'aggiunta di additivi in combinazione nella miscela permette di ottenere prestazioni ancora migliori perché vengono combinati anche gli effetti positivi apportati dai singoli additivi; infatti, con l'aggiunta di fumo di silice e cenere volante si ottiene una microstruttura della pasta cementizia più omogenea ed inoltre, con l'aggiunta di superfluidificante, si riduce anche la porosità, per via del minore rapporto acqua/cemento che si va ad utilizzare [20]. Inoltre, l'aggiunta di additivi in combinazione, porta un aumento del numero delle bolle d'aria all'interno della miscela ma, allo stesso tempo, la dimensione delle bolle risulterà inferiore, così come la loro connettività, evitando in tal modo la loro fusione, per di più, anche la distribuzione delle dimensioni delle bolle d'aria sarà più omogenea; tutto ciò permette quindi di ottenere resistenze a compressione più elevate [20]. Quindi, questo conferma ulteriormente che, per migliorare la resistenza a compressione di un calcestruzzo schiumato è necessario avere sia una migliore microstruttura della pasta cementizia, sia una migliore struttura del sistema dei vuoti all'interno della miscela.

Per quanto riguarda la struttura dei vuoti all'interno della miscela, bisogna prestare attenzione anche al quantitativo di schiuma introdotto; è stato riscontrato che, un aumento del quantitativo di schiuma introdotta nella miscela, porta ad avere delle bolle che tendono a fondersi tra loro generando pertanto bolle di dimensioni maggiori e ad ottenere una minore omogeneità nella distribuzione delle dimensioni delle bolle, causando pertanto una diminuzione della resistenza del materiale [20].

Risulta interessante quanto scoperto nello studio condotto da Bo Zhou et al. [22], a proposito degli effetti generati dall'introduzione di additivi in polvere nella miscela (in questo caso fumo di silice, scorie e cenere volante) in sostituzione a parte del cemento in peso, analizzandone l'effetto, sia del singolo additivo, sia della combinazione di due differenti additivi, in termini di resistenza a compressione. In questo caso la schiuma nell'impasto è stata prodotta chimicamente aggiungendo del perossido di idrogeno alla miscela cementizia durante gli ultimi secondi di miscelazione. Analizzando l'effetto apportato da ogni singolo additivo minerale, quello che ha contribuito maggiormente all'incremento della resistenza a compressione è stato il fumo di silice per via delle ridotte dimensioni delle particelle se confrontate a quelle del cemento e, soprattutto, per l'elevata reattività, maggiore di quella degli altri due additivi in polvere. Il fumo di silice, infatti, è un materiale altamente reattivo e, in presenza di un adeguato superfluidificante nella miscela, reagisce con la calce presente nella miscela per formare nuovo CSH (CSH secondario), contribuendo pertanto alla fase di indurimento e ad ottenere una migliore struttura interna del calcestruzzo, migliorando in tal modo la resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato. Le scorie invece hanno portato a valori di resistenza inferiori a quelli ottenuti con la sola introduzione di fumo di silice ma superiori a quelli ottenuti utilizzando la cenere volante, a parità di quantità aggiunta. Questo è dovuto alla maggiore reattività delle scorie rispetto alla cenere volante, portando in tal modo alla formazione di un quantitativo maggiore di prodotti di idratazione e riducendo maggiormente la porosità del calcestruzzo [22]. La reattività della scoria dipende dalla sua composizione e principalmente dal rapporto C<sub>a</sub>O/SiO<sub>2</sub> e

dal contenuto di vetro: la reattività risulterà maggiore all'aumentare del rapporto  $C_aO/SiO_2$  e all'aumentare del contenuto di vetro [22]. Nella seguente figura, vengono invece mostrati i risultati, in termini di resistenza a compressione a 3, 7 e 28 giorni, delle miscele contenenti due differenti tipologie di additivi in polvere:

Sample	Un	iaxial compressive stren	gth/MPa
#	3 days	7 days	28 days
1	8.52	10.51	12.27
2	9.89	12.83	14.72
3	9.64	13.32	14.38
4	7.20	10.68	13.26
5	11.04	13.96	14.75
6	10.80	12.40	15.02
7	11.40	12.20	15.55

Figura 2.21: Valori di resistenza a compressione di differenti miscele al variare del tempo di maturazione [22]

Come si nota dalla Figura 2.21, sono state realizzate sette differenti miscele, con una densità di 1200 kg/m<sup>3</sup>, precisamente: la miscela 1, che non presenta l'aggiunta di alcun additivo in polvere, nelle miscele 2, 3 e 4, è stato invece aggiunto un solo additivo in polvere (nel seguente ordine fumo di silice, scorie, cenere volante) sostituendolo parzialmente al cemento, nelle miscele 5, 6 e 7, il cemento è stato in parte sostituito da due differenti additivi in polvere (scorie + cenere volante, fumo di silice + cenere volante, fumo di silice + scorie). Focalizzando l'attenzione ai valori di resistenza a compressione a 28 giorni, viene riscontrato dai risultati che, i valori maggiori di resistenza vengono raggiunti dalle miscele in cui vi è la presenza di due differenti additivi in polvere massimo viene raggiunto dalla miscela numero 7, contenente al suo interno fumo di silice e delle scorie e questo ha portato alla formazione di una grande quantità di silicato di calcio idrato (CSH) riducendo quindi la porosità della miscela e migliorando la struttura dei pori, incrementando pertanto la resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato [22].

Come nei calcestruzzi tradizionali, anche per il calcestruzzo schiumato la maggior parte della resistenza meccanica viene sviluppata entro i 28 giorni (il processo di indurimento continua in maniera indefinita nel tempo) e questo dipende dalla tipologia di cemento utilizzata e dalla temperatura a cui è sottoposto il calcestruzzo durante la fase di indurimento. I ricercatori Cong Ma, Bing Chen, in una loro ricerca [23], hanno realizzato una miscela di calcestruzzo schiumato sostituendo il classico cemento Portland ordinario con un cemento al fosfato di magnesio; questo ha permesso di realizzare un calcestruzzo schiumato in grado di raggiungere proprietà meccaniche e di isolamento termiche migliori rispetto ad un calcestruzzo schiumato realizzato con cemento Portland ordinario, ma soprattutto, in grado di sviluppare circa il 70 % della resistenza a compressione a 28 giorni in sole 3 ore dal getto. Il materiale cementizio è realizzato con ossido di magnesio essiccato (MgO) e diidrogenofosfato di ammonio (NH<sub>4</sub>)H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, a cui è stata aggiunta l'acqua, un ritardante a base di borato di sodio (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>), l'agente schiumogeno (in questo caso bicarbonato di sodio, NaHCO<sub>3</sub>) che viene aggiunto direttamente nella miscela liquida, e uno stabilizzatore della schiuma . Nella seguente figura vengono riportati i valori di resistenza a compressione raggiunti sia a 28 giorni che addirittura in tre ore:



Figura 2.22: Valori di resistenza a compressione e di conducibilità termica, a tre ore e a 28 giorni, di calcestruzzi schiumati con cemento al fosfato di magnesio al variare della densità [23]

La Figura 2.22 mette in luce l'andamento della resistenza a compressione del calcestruzzo schiumato con cemento al fosfato di magnesio al variare della densità. Il calcestruzzo con densità pari a 1600 kg/m<sup>3</sup> è l'unico, tra le differenti miscele mostrate nel grafico, a non essere schiumato, e questo è possibile capirlo dall'assenza di bicarbonato di sodio nel mix design, ma spostando l'attenzione sulle miscele di calcestruzzo schiumato, che risultano avere in questo studio un maggiore interesse, prendendo in considerazione una densità di 1300 kg/m<sup>3</sup>, è stata raggiunta una resistenza a compressione poco inferiore a 25 MPa e, cosa molto interessante, la resistenza a compressione raggiunta in sole tre ore dal getto è pari a circa il 70% della resistenza a compressione e i valori di conducibilità termica, viene riportato che le miscele di calcestruzzo schiumato con cemento a base di fosfato di magnesio, hanno ottenuto prestazioni migliori rispetto alle miscele di calcestruzzo schiumato con

cemento Portland ordinario a parità di densità secca [23]. È stato anche studiato l'effetto dell'aggiunta di additivi minerali (cenere volante e fumo di silice) nelle miscele di calcestruzzo schiumato con cemento al fosfato di magnesio, analizzando però solo le bassissime densità (550 kg/m<sup>3</sup>), viene pertanto solo riportato qualche accenno, in quanto interessante per comprendere il differente effetto apportato dall'aggiunta di additivi in polvere ai calcestruzzi con cemento Portland ordinario e ai calcestruzzi schiumati con cemento al fosfato di magnesio. La variazione della resistenza a compressione dovuto all'introduzione della cenere volante nella miscela può essere apprezzata nella seguente Figura 2.23:



Figura 2.23: Effetto del contenuto di cenere volante nei calcestruzzi schiumati con cemento al fosfato di magnesio [23]

Attraverso l'introduzione di cenere volante nei calcestruzzi schiumati con cemento al fosfato di magnesio, si osserva un aumento della resistenza per un contenuto di cenere volante che non oltrepassa il 10% della quantità totale di materiale cementizio; andando oltre tale quantitativo, la resistenza comincia a diminuire raggiungendo, per un quantitativo pari al 20%, un valore di resistenza quasi uguale a quello di partenza relativo alla miscela senza cenere volante.

L'introduzione del fumo di silice nelle miscele di calcestruzzo schiumato con cemento al fosfato di magnesio non ha invece avuto un effetto benefico nei confronti della resistenza a compressione:



Figura 2.24: Effetto del contenuto di fumo di silice nei calcestruzzi schiumati con cemento al fosfato di magnesio [23]

A differenza dei calcestruzzi schiumati con cemento Portland ordinario, come già visto precedentemente, in cui il fumo di silice veniva introdotto nella miscela per migliorarne le proprietà meccaniche, nel caso dei calcestruzzi schiumati con cemento al fosfato di magnesio, l'introduzione di fumo di silice ha portato solo ad un peggioramento della resistenza a compressione indipendentemente dal quantitativo introdotto nella miscela.

Per ottenere un calcestruzzo schiumato che sia più green e che quindi sia più sostenibile, ma che allo stesso tempo garantisca delle discrete proprietà meccaniche, è possibile utilizzare dei materiali di scarto, come ad esempio il guscio della palma da olio, come aggregato grossolano. Il guscio della palma da olio è prodotto di scarto che si ottiene dall'estrazione dell'olio di palma, e considerando che solo la Malesia produce circa quattro milioni di tonnellate di tale materiale di scarto ogni anno potrebbe essere una soluzione interessante per poter cercare di riciclarlo anche in parte. Nello studio condotto da U. Johnson Alengaram et al. [24], è stato realizzato un calcestruzzo schiumato utilizzando come aggregato fine la sabbia passante al setaccio con apertura 2.36 mm e il guscio di palma da olio come aggregato grossolano, eliminando la frazione di materiale passante al setaccio con apertura 2.36 mm. Sono stati inoltre introdotti nella miscela, cenere volante che è stata sostituita al 5% in peso del cemento e il fumo di silice sostituito al 10% in peso del cemento.

Nella seguente figura vengono mostrati i valori di resistenza a compressione ottenuti al variare della densità:



Figura 2.25: Valori di resistenza a compressione di calcestruzzi schiumati con guscio di olio da palma come aggregato grossolano, al variare della densità [24]

Il massimo valore di resistenza a compressione pari a 20,2 MPa, a 28 giorni di stagionatura, è stato raggiunto dalla miscela con una densità pari a 1600 kg/m<sup>3</sup>.

# 2.4.1.2 <u>Miglioramento delle proprietà meccaniche del calcestruzzo schiumato tramite</u> <u>l'aggiunta di fibre</u>

Il calcestruzzo schiumato appartiene alla categoria dei calcestruzzi alleggeriti ed è quindi caratterizzato da modesti valori di resistenza a compressione, motivo per il quale non viene utilizzato per applicazioni strutturali; inoltre, la miscela indurita, a causa dell'elevata quantità di aria inglobata al suo interno, risulta soggetta ad elevati valori di ritiro [25]. Come già detto, attraverso alcune modifiche apportate al mix design, si riesce comunque a migliorarne le proprietà meccaniche a tal punto da raggiungere prestazioni adeguate per un eventuale utilizzo in ambito strutturale. Come anche visto per i calcestruzzi tradizionali, anche nei calcestruzzi schiumati è possibile migliorare le proprietà meccaniche mediante l'introduzione di fibre al suo interno. Esistono varie tipologie di fibre, sia naturali come ad esempio le fibre di banana, di bamboo, di cocco, di legno, sia artificiali, come le fibre di acciaio e le fibre di polipropilene. Le fibre di acciaio che vengono utilizzate nei calcestruzzi vengono realizzate dalla trafilatura a freddo di un filo di acciaio a basso tenore di carbonio che poi viene soggetto ad una fase di taglio per creare le fibre della lunghezza desiderata. Esse presentano solitamente diametri compresi tra 0.7 e 1.2 mm e lunghezze comprese tra 25 e 60 mm, la cui forma della sezione può essere rotonda oppure triangolare. Possono avere una superficie liscia oppure rugosa, migliorando in quest'ultimo caso l'adesione con il calcestruzzo. Si può affermare che tale tipologia di fibre non è proprio ottimale per i calcestruzzi schiumati per via del loro peso, infatti, un dosaggio eccessivo di tali fibre potrebbe comportare un aumento della massa del composto e quindi un aumento della densità [25]. Un'altra tipologia di fibre artificiali utilizzate nei calcestruzzi, che rappresenta la tipologia ideale per i calcestruzzi schiumati, è quella delle fibre in polipropilene, caratterizzate da una lunghezza media di 19 mm e un diametro di 30 µm. Tali fibre hanno una bassa densità  $(0.9 - 0.95 \text{ g/cm}^3)$ , ancora più bassa delle fibre di PVA (Polyvinil Alcohol) e pur presentando bassi valori del modulo elastico (1.5 – 10 GPa) risultano avere buone prestazioni in termini di durata. La resistenza a trazione è compresa tra 240 e 760 MPa con un allungamento ultimo compreso tra 15 – 80% [25].

Focalizzando l'attenzione sulle proprietà della miscela fresca di calcestruzzo schiumato, l'aggiunta di fibre potrebbe rappresentare un'alternativa per migliorare la stabilità in termini di densità del calcestruzzo schiumato piuttosto che optare per la sostituzione di sabbia con aggregati più fini che potrebbe portare ad un aumento sostanziale della densità; infatti, ad esempio, un calcestruzzo schiumato con l'aggiunta di fibre presenterebbe valori di densità più bassi rispetto ad un calcestruzzo schiumato con sabbia sostituita da pozzolana [25]. Inoltre, bisogna precisare che, la densità fresca di un calcestruzzo schiumato, dipende dalla densità dei singoli componenti del calcestruzzo, pertanto l'aggiunta di materiali con un maggior peso, potrebbero portare certamente ad un aumento della resistenza del calcestruzzo ma anche, ad un aumento della densità. Quindi, per raggiungere i valori di densità e di resistenza desiderati in un calcestruzzo schiumato, bisogna puntare nella scelta dei corretti componenti del calcestruzzo prestando attenzione alla loro densità ed inoltre, cercare di ottenere una schiuma quanto più stabile possibile evitando in tal modo di avere nella miscela fresca la rottura di alcune bolle che possono portare un aumento della densità nella miscela una volta indurita [25].

Le proprietà di un calcestruzzo schiumato rinforzato mediante l'aggiunta di fibre dipendono, oltre che dalla tipologia di fibre, anche dalle loro caratteristiche geometriche (lunghezza, diametro, forma) e dal quantitativo introdotto nella miscela; difatti, una quantità eccessiva di fibre introdotte nella miscela potrebbe portare addirittura ad un peggioramento della resistenza e sicuramente anche ad un peggioramento della lavorabilità. L'introduzione di fibre nel calcestruzzo modifica le caratteristiche della miscela allo stato fresco, in quanto, per via della loro grande superficie specifica, si verifica un assorbimento della malta attorno alle fibre e questo porta ad un aumento della viscosità del calcestruzzo schiumato e ad un peggioramento della lavorabilità; tuttavia, attraverso una corretta progettazione della miscela di calcestruzzo schiumato fibro-rinforzato e quindi, introducendo il contenuto ottimale di fibre, è possibile ottenere guadagni in termini di proprietà meccaniche e allo stesso tempo una miscela che possa godere di una adeguata lavorabilità.

Le proprietà meccaniche di un calcestruzzo schiumato dipendono dalla microstruttura cementizia e l'introduzione di fibre nella matrice di calcestruzzo permette di migliorarle. Naturalmente, come già accennato prima, l'effetto apportato dalle fibre dipende anche dalla tipologia di fibre introdotte, quantitativo e dalla loro

geometria. In uno studio condotto da Bing et al. [26], è stato analizzato l'effetto sulle proprietà meccaniche e sulla durabilità (resistenza a compressione, resistenza a flessione e ritiro) dell'introduzione di fibre di polipropilene nel calcestruzzo schiumato. Nella seguente figura, vengono mostrati i valori di resistenza a compressione a 90 giorni sia delle miscele senza fibre, sia delle miscele con l'aggiunta di fibre, in modo da poter fare un confronto:



Figura 2.26: Valori di resistenza a compressione in funzione della quantità di schiuma delle miscele di calcestruzzo schiumato con fibre di Polipropilene e senza fibre [26]

Come si evince, a prescindere dal volume di schiuma presente nella miscela, l'aggiunta di fibre ha apportato un notevole incremento della resistenza a compressione. Nel grafico sono mostrate le miscele appartenenti a due serie e l'unica differenza tra le due serie sta nel fatto che la serie II comprende le miscele in cui una parte del cemento è stata sostituita con del fumo di silice; inoltre, tutte le miscele contengono al loro interno la cenere volante. Sono state analizzate le seguenti densità: 1500, 1300, 1000 e 800 kg/m<sup>3</sup> e l'incremento di resistenza dovuto all'aggiunta di fibre di polipropilene per le miscele della Serie I è stato rispettivamente del 16%, 25%, 33% e 45% [26]; quindi un incremento della resistenza a compressione sempre più accentuato al diminuire della densità. I valori di resistenza delle miscele appartenenti alla Serie II risultano maggiori proprio per la presenza del fumo di silice. Nelle miscele appartenenti a quest'ultima serie l'incremento di resistenza dovuto all'introduzione delle fibre è stato meno accentuato e, precisamente, per le densità di 1500, 1300, 1000 e 80 kg m/<sup>3</sup> l'incremento della resistenza a compressione a 90 giorni è stato del 5,6%, 13,3%, 27%, e 27,5% [26].

L'aggiunta di fibre di polipropilene ha portato dei benefici anche alla resistenza a trazione:





L'introduzione delle fibre di polipropilene nella miscela ha portato ad un aumento della resistenza ad ogni miscela e l'incremento di resistenza varia in base al differente contenuto di schiuma presente nella miscela, precisamente: nei campioni appartenenti alla Serie I, con un contenuto del 30%, 40% e 50% di schiuma in volume, si è verificato un incremento del 40%, 45%, 50% della resistenza a trazione [26]. Invece, nei campioni appartenenti alla Serie II, l'incremento è stato leggermente inferiore rispetto a quello ottenuto nei campioni della Serie I.

Il vantaggio dell'introduzione delle fibre nel calcestruzzo schiumato è quello di rinforzare la struttura del calcestruzzo migliorando le proprietà meccaniche, soprattutto la resistenza a flessione e consentendo al materiale, inizialmente fragile, di migliorare la sua tenacità, presentando pertanto un carattere duttile e quindi elastoplastico, e migliorando quindi il comportamento post-cricca [7].

Il calcestruzzo schiumato mostra bassi valori del modulo elastico, se confrontato con i valori dei calcestruzzi tradizionali che risultano essere circa quattro volte superiori. L'introduzione di fibre potrebbe risolvere anche questa problematica; è stato infatti scoperto che l'aggiunta del 3% in volume di fibre di polipropilene in una miscela di calcestruzzo schiumato con una densità di 1800 kg/m<sup>3</sup> ha portato ad un incremento del 40% modulo elastico [25].

Il calcestruzzo schiumato, per via della presenza di schiuma al suo interno, mostra valori accentuati di ritiro per essiccamento nel tempo, che possono portare alla formazione di una precoce fessurazione compromettendo pertanto la resistenza del calcestruzzo. Si è visto che l'introduzione di fibre di polipropilene permette di migliorare anche questa criticità. Nella Figura 2.29 viene riportata la deformazione di ritiro per essiccamento in funzione del tempo e della quantità di schiuma presente nella miscela di calcestruzzo:



Figura 2.28: Deformazione da ritiro per essicamento in funzione del tempo e del volume di schiuma nella miscela [26]

Come si nota dalla Figura 2.28, le miscele che contengono una maggiore quantità di schiuma presentano anche valori maggiori di deformazione dovuta al ritiro per essiccamento e i massimi valori di deformazione sono pertanto raggiunti dalla miscela contenente il 50% di schiuma in volume. Le miscele appartenenti alla Serie II, contenenti fumo di silice, mostrano valori di deformazione dovuta al ritiro per essiccamento, leggermente inferiori. Nella Figura 2.29, vengono invece riportati i valori delle deformazioni da ritiro per essicamento delle miscele con l'aggiunta di fibre di polipropilene; è quindi possibile apprezzare l'effetto positivo apportato dall'introduzione delle fibre nelle miscele di calcestruzzo schiumato confrontando la Figura 2.28 con la Figura 2.29.



Figura 2.29: Effetto delle fibre di polipropilene nel ritiro per essiccamento dei calcestruzzi schiumati [26]

Come si evince dal confronto tra le due figure, l'introduzione di fibre di polipropilene nel calcestruzzo schiumato porta ad avere una riduzione delle deformazioni da ritiro per essicamento e, come già visto per la resistenza a trazione, l'effetto positivo apportato dall'introduzione delle fibre è più pronunciato nelle miscele appartenenti alla Serie I, in cui non vi è la presenza del fumo di silice.

#### 2.5 Applicazioni del calcestruzzo schiumato

Sulla base di tutte le caratteristiche analizzate, è possibile affermare che il calcestruzzo schiumato può essere applicato per vari scopi ingegneristici in ambito civile e strutturale; difatti, è un materiale che alle basse densità presenta buone caratteristiche termoisolanti, elevata fluidità e lavorabilità ed inoltre proprietà di auto compattamento che consentono pertanto di non applicare alcuna vibrazione esterna. Invece, alle alte densità (in ogni caso inferiori a quelle di un calcestruzzo tradizionale) presenta valori di resistenza che ne consentono un utilizzo per fini strutturali. Al variare del contenuto di schiuma si riesce a modificare la densità del calcestruzzo schiumato e a soddisfare un intervallo piuttosto ampio di densità comprese tra 200 kg/m<sup>3</sup> circa e 1900 kg/m<sup>3</sup> circa; pertanto, è un materiale molto versatile, adatto ad esigenze molto diverse. Il suo utilizzo è ormai diffuso in tutto il mondo: nel Regno Unito si stima una produzione annuale di circa 250.000 – 300.000 m<sup>3</sup> di calcestruzzo schiumato, in Corea circa 250.000 m<sup>3</sup> l'anno utilizzato soprattutto nei sistemi di riscaldamento a pavimento,

in Canada circa 50.000 m<sup>3</sup> l'anno. In Medio Oriente è molto diffuso nelle costruzioni allo scopo di ridurre gli effetti apportati dal sisma, probabilmente per via delle buone proprietà di assorbimento energetico dovute alla presenza dei vuoti. È ampiamente utilizzato anche nella realizzazione di strutture prefabbricate, poiché, per via delle basse densità che si riescono a raggiungere, risulta possibile realizzare blocchi e panelli prefabbricati piuttosto leggeri. Il calcestruzzo schiumato è un materiale che gode di una buona lavorabilità e scorrevolezza, questo lo rende un ottimo materiale per essere utilizzato come una malta per il riempimento di vuoti, cavità e per andare a riempire condotte non più utilizzate. Inoltre, rappresenta anche una valida ed economica soluzione da adottare per il ripristino e il rinforzo di strutture ammalorate. L'elevata presenza di vuoti al suo interno, vuoti tra loro non interconnessi, conferisce al materiale che viene anche utilizzato per isolare strutture di fondazione superficiali e per ridurre il congelamento dei pali di fondazione poco profondi.

# **Capitolo 3**

# **3** Fase sperimentale

#### 3.1 Progetto delle miscele e caratteristiche allo stato fresco

#### 3.1.1 Miscela MIX1

Il calcestruzzo schiumato appartiene alla categoria dei calcestruzzi alleggeriti, precisamente ai calcestruzzi cellulari, caratterizzati dall'avere una notevole quantità di aria all'interno della miscela; nei calcestruzzi schiumati, l'aria viene inglobata mediante l'introduzione di una schiuma preformata all'interno dell'impasto. La notevole quantità di aria presente all'interno della miscela consente al calcestruzzo schiumato di avere una struttura interna piuttosto porosa per via della presenza delle bolle d'aria e questo porta ad avere un materiale più leggero, caratterizzato quindi da densità inferiori rispetto quelle dei calcestruzzi tradizionali e con buone proprietà di isolamento acustico, isolamento termico e resistenza al fuoco ma, allo stesso tempo, modeste proprietà meccaniche che non ne consentono un utilizzo in ambito strutturale.

L'obiettivo della presente campagna sperimentale è stato quello di progettare ed ottenere una miscela di calcestruzzo schiumato che potesse raggiungere delle proprietà meccaniche adeguate per un utilizzo strutturale. Per il raggiungimento di tale obiettivo, risultava necessario raggiungere un valore della resistenza a compressione di almeno 25 MPa, cercando di mantenere quanto più basso possibile il valore della densità e, quindi, facendo sempre rientrare il materiale nella categoria dei calcestruzzi alleggeriti.

Il primo step è stato quello di progettare una miscela che raggiungesse una densità target compresa tra 1850 kg/m<sup>3</sup> e 1900 kg/m<sup>3</sup>. Il progetto della prima miscela è avvenuto mediante l'utilizzo dei rapporti di sabbia/cemento, acqua/cemento, schiuma/cemento, viscosizzante/cemento e superfluidificante/cemento, già consolidati da sperimentazioni fatte in passato, in modo tale da avere già una buona base di partenza, che è stata poi migliorata ed ottimizzata in funzione dei risultati da raggiungere.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori dei rapporti di progetto della prima miscela (MIX1):

Rapporti MIX1						
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento		
2,3	0,345	0,12	0,05	0,015		

Tabella 3.1: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX1

Dai valori dei rapporti riportati nella Tabella 3.1, sono state successivamente determinate le grammature per ogni singolo ingrediente della miscela di calcestruzzo schiumato, come riportato nella seguente tabella:

Tabella 3.2: Ingredienti e grammature di ogni singolo componente della miscela MIX1

Ricetta MIX1			
Componente	Peso [g]		
cemento	550		
sabbia fine (0÷2 mm)	1265		
acqua	190		
schiuma	66		
viscosizzante	27,5		
superfluidificante MASTEREASE	8,25		
tensioattivo FOAMIN			

Il primo passo per la realizzazione di ciascuna miscela prevede la pesatura di ogni singolo ingrediente; è importante prestare la massima precisione e attenzione alla corretta pesatura di ogni singolo ingrediente per evitare di realizzare una miscela che non rispecchi le caratteristiche desiderate e, quindi, di ottenere un comportamento del materiale non corretto, alterando pertanto il proseguimento della ricerca. Al fine di ottenere la massima precisione nella pesatura degli ingredienti, sono state utilizzate differenti tipologie di bilance, ognuna caratterizzata da una precisione differente, in funzione del tipo di ingrediente da dover pesare.

Successivamente, una volta preparati e pesati tutti gli ingredienti si procede con la preparazione della miscela. Nel presente lavoro di ricerca, la preparazione del calcestruzzo schiumato è avvenuta preparando separatamente la malta cementizia e la schiuma; solo in seguito, la schiuma preformata è stata introdotta nella malta durante la fase di miscelazione. La malta è stata preparata mediante l'utilizzo di un miscelatore attraverso una miscelazione di tipo turbolento.

Inizialmente si procede con l'introduzione delle polveri (cemento e viscosizzante) con acqua e superfluidificante all'interno del miscelatore e si inizia a miscelare a velocità bassa. Il miscelatore permette infatti di miscelare mediante due differenti velocità di rotazione della frusta: miscelazione a bassa velocità e miscelazione ad alta velocità. Si procede quindi con una miscelazione a bassa velocità fin quando tutto il materiale non

risulta ben omogeneizzato. A questo punto è possibile inserire poco per volta la sabbia, continuando sempre a miscelare a bassa velocità. Nel frattempo, è necessario preparare la schiuma, in quanto deve risultare pronta per essere introdotta nella miscela una volta inserita tutta la sabbia. Per la realizzazione della schiuma viene utilizzata una concentrazione del tensioattivo pari al 5%. Una volta pronta la schiuma, deve essere introdotta il prima possibile nella boiacca cementizia e questo deve essere fatto durante la fase di miscelazione della stessa.

Come noto, infatti, fin dal termine della sua generazione la schiuma è sottoposta al fenomeno del drenaggio che porta alla deposizione della fase fluida sul fondo con la modifica delle proprietà della schiuma, evidenti anche da una semplice analisi visiva: da una forma sferica delle bolle si passa ad una forma poliedrica con perdita del comportamento elastico.

Durante la fase di miscelazione, prima dell'introduzione della schiuma, al fine di migliorare l'omogeneità del sistema cementizio, si è provveduto anche a raschiare il materiale presente sul fondo del contenitore e sulle pareti, procedendo con una ulteriore miscelazione. Questo è anche previsto dalla procedura standardizzata per la preparazione delle malte classiche, ossia non alleggerite. Tuttavia, nel caso in questione, durante la fase di miscelazione si è evidenziato un sistema cementizio poco coeso, dall'aspetto di terra umida. Si è dunque ritenuto necessario aggiungere altra acqua in modo da far legare la miscela. Il contenuto di acqua che inizialmente era stato fissato pari a 165 g (rapporto a/c = 0,3) è stato poi modificato a 170 g, aggiungendo pertanto ulteriori 5 g di acqua. Continuando con la miscelazione, la miscela, non riuscendo ancora a legare, ha richiesto l'aggiunta di ulteriori 10 g di acqua, raggiungendo a tal punto un contenuto totale di acqua pari a 180 g. Aggiunta la restante acqua è stata eseguita, prima una miscelazione a bassa velocità per circa trenta secondi e, successivamente, una miscelazione ad alta velocità per circa un minuto. Dopodiché la miscela è risultata fin da subito più legata ma non a tal punto da poter accogliere la schiuma, pertanto, sono stati aggiunti ulteriori 10 g di acqua. Introdotta l'acqua aggiuntiva, la miscela risultava legata e pronta per accogliere la schiuma e, dopo un ulteriore raschiatura delle pareti e successiva miscelazione, è stata introdotta la schiuma nella boiacca cementizia. L'introduzione della schiuma nella miscela deve avvenire avendo prima impostato la miscelazione a velocità alta, così da limitare al massimo la formazione di grumi per flocculazione delle particelle di cemento ed inoltre, deve essere introdotta nel minor tempo possibile (pochi secondi), in modo tale da non far alterare le proprietà della schiuma stessa. Introdotta la schiuma, si continua a miscelare ad alta velocità per ulteriori 30 secondi circa. A questo punto, bisogna verificare se il progetto della miscela è andato a buon fine mediante la valutazione della densità allo stato fresco.

Il calcolo della densità fresca è stato eseguito mediante l'utilizzo di un becher con volume e peso noti. La miscela è stata quindi introdotta all'interno del becher, cercando man mano di compattarla mediante un cucchiaio, questo perché, essendo un calcestruzzo schiumato, non può essere vibrato esternamente come un calcestruzzo tradizionale. Quindi, se la miscela non deve essere utilizzata per fini di stampa 3D, è bene che il calcestruzzo abbia una consistenza molto fluida in modo tale da autocompattarsi. In questa fase risulta molto importante valutare la stabilità della miscela e questo si dimostra possibile, inizialmente, mediante un'analisi visiva della miscela che metta in evidenza la stabilità qualitativa delle bolle d'aria e, successivamente, mediante il calcolo della densità fresca nel tempo. La miscela è stabile se, dopo aver movimentato un po' il materiale non si notano collassi delle bolle d'aria inglobate nella matrice cementizia. La miscela (MIX1) ha presentato bolle pressoché stabili, mostrando un numero piuttosto basso di coalescenza di bolle; l'equilibrio della miscela risultava pertanto migliorabile.

I valori calcolati della densità allo stato fresco vengono riportati nella Tabella 3.3

	Calco	lo densità allo stato f	resco
		Volume [l]	
		1,04	
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]
	1675	1762	1751
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]
	1770	1867	1856
Incremento [%]		5,19	-0,62

Dal primo valore della densità allo stato fresco, pari a 1661 kg/m<sup>3</sup>, si nota subito che il valore risulta inferiore, e non di poco, rispetto quello atteso (tra 1850 kg/<sup>3</sup> e 1900 kg/m<sup>3</sup>). Questo può essere dovuto ad un quantitativo eccessivo di schiuma introdotta nella miscela oppure, il quantitativo introdotto (66 g) risultava idoneo al quantitativo di acqua iniziale (165 g) e non alla quantità di acqua realmente introdotta (190 g). Tuttavia, l'aggiunta della schiuma in quella condizione, ossia di terra umida, avrebbe condotto alla produzione di un calcestruzzo schiumato caratterizzato dalla presenza di grumi per la flocculazione delle particelle di cemento, con effetti negativi sulle proprietà allo stato indurito della miscela stessa.

Il passo successivo riguarda la valutazione della tenuta della densità nel tempo, in quanto è necessario che la miscela mantenga una buona stabilità nel tempo e quindi presenti variazioni in termini di densità quanto più piccole possibili. È normale che la densità subisca delle piccole variazioni nel tempo perché, allo stato fresco, il conglomerato cementizio alleggerito con bolle d'aria è un sistema in equilibrio dinamico; tuttavia, come detto, tali variazioni dovrebbero mantenersi in un intervallo molto stretto, se possibile di ± 50 kg/m<sup>3</sup>. Nel caso della miscela MIX1, si è visto che il sistema risultava piuttosto stabile in quanto, senza scuotere il materiale, le macrobolle non scoppiavano e risultavano ferme, tranne piccole eccezioni, al contrario di quanto

accade in un sistema instabile, caratterizzato dal collasso quasi repentino del sistema di bolle d'aria con la segregazione del sistema cementizio.

Dal secondo valore di densità calcolato, si è notato che quest'ultima aveva subito un incremento tale da risultare superiore all'intervallo di ± 50 kg/m<sup>3</sup>; a tal punto, risultava necessaria un'ulteriore valutazione della densità fresca per vedere cosa sarebbe successo. Il terzo valore di densità risultava piuttosto vicino al secondo, questo significava che la miscela aveva acquisito la stabilità e la manteneva nel tempo. Quest'ultimo valore di densità rappresenta il valore di densità allo stato fresco corretto che può essere poi approssimato a 1700 kg/m<sup>3</sup>.

Il passo successivo alla valutazione della densità allo stato fresco è quello della valutazione della consistenza e scorrevolezza del materiale mediante la valutazione dello slump e del flow.

La valutazione dello slump è avvenuta mediante l'utilizzo di: una base di appoggio, un cilindro di altezza 80 mm e diametro 77 mm e un calibro. Il materiale viene versato all'interno del cilindro e, una volta riempito, viene compattato con una barra di diametro 8 mm e ne viene lisciata la parte superficiale, evitando di produrre compattazione, in modo tale da togliere il materiale in eccesso; infine, il cilindro viene sollevato in circa tre secondi; successivamente viene valutato, mediante l'ausilio di un calibro, l'abbassamento del materiale rispetto all'altezza iniziale del cilindro. Lo slump viene valutato mediante la media dei valori di abbassamento misurati in corrispondenza del punto più alto e del punto più basso della superficie. Oltre allo slump viene anche misurato il flow, ovvero il diametro della base del cono; la misurazione viene fatta sempre mediante l'ausilio del calibro, andando a valutare la dimensione del diametro della base del cono in due direzioni tra loro ortogonali. I valori dello slump e del flow ottenuti per la miscela MIX1 sono riportati nella seguente Tabella 3.4:

Slump test			
Slump [mm] 37			
Slump flow	D1 [mm]	123	
Siump now	D2 [mm]	122	

Tabella 3.4: Valori dello slump e del flow ottenuti per la miscela MIX1

#### 3.1.2 Miscela MIX2

Con la realizzazione della miscela MIX2 si è cercato di migliorare ed ottimizzare la miscela MIX1. Per fare questo è stato diminuito il contenuto d'acqua, riducendo il rapporto a/c ad un valore pari a 0,325, introducendo quindi un contenuto d'acqua pari a 178,75 g. La riduzione del contenuto di acqua avrebbe però portato ad ottenere un impasto difficile da miscelare, come riscontrato nel MIX1; pertanto, per risolvere il

problema, è stato aumentato il quantitativo di superfluidificante dall'1,5% al 2% rispetto al peso del cemento. Tutti gli altri ingredienti sono rimasti invariati a quelli del MIX1. Nelle seguenti tabelle vengono riportati i valori dei rapporti di progetto del mix design e la ricetta della miscela MIX2:

Tahella 3 5·	Valori dei	rannorti di	nrogetto	del mix design	relativi alla	miscela MIX2
Tabella 5.5.	valuti uei	rapporti ui	progetto	uel IIIX uesign	relativi alla	

Rapporti MIX2						
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento		
2,3	0,325	0,12	0,05	0,02		

Tabella 3.6: Ingredienti e grammature di ogni singolo componente della miscela MIX2

Ricetta MIX2	
Componente	Peso [g]
cemento	550
sabbia fine (0÷2 mm)	1265
acqua	178,75
schiuma	66
viscosizzante	27,5
superfluidificante MASTEREASE	11
tensioattivo FOAMIN	

Eseguita la miscelazione di tutti gli ingredienti, l'impasto ha mostrato una maggiore stabilità rispetto al MIX1, con il collasso, valutato qualitativamente, di un minore quantitativo di bolle. Il materiale, se confrontato al MIX1, presentava una differente reologia in quanto tendeva a colare. Facendo un confronto visivo tra la miscela MIX2 e la miscela MIX1, la prima ha mostrato un colore più chiaro, una maggiore viscosità e una maggiore fluidità, come è possibile riscontrare anche dai maggiori valori dello slump e flow che verranno mostrati in seguito.

### 3.1.2.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2

Vengono riportati nella seguente tabella i valori della densità allo stato fresco valutati per la miscela MIX2:

Tabella 3.7: Valori calcolati della densità allo stato fresco relativi alla miscela MIX2

Calcolo densità allo stato fresco	
Volume [l]	

		1,04	
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]
	1595,22	1664	1675,63
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 2 [kg/m3]	Densità 3 [kg/m3]
	1642	1716	1728
Incremento [%]		4,31	0,70

I valori di densità allo stato fresco ottenuti per la miscela MIX2 sono apparsi piuttosto inferiori rispetto quelli ottenuti per la miscela MIX1. Questo sta ad indicare che, un aumento del superfluidificante, nonostante una leggera minore quantità di acqua introdotta nell'impasto, consente comunque di ottenere una migliore tenuta della schiuma. Tra la prima e la seconda valutazione della densità fresca, il valore ha subito un piccolo incremento pari al 4.31 %, invece tra la seconda e la terza valutazione l'incremento è stato solo lo 0.70%: questo sta ad indicare che la miscela tende a stabilizzarsi.

# 3.1.2.2 Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2

Di seguito viene riportata una foto che mostra la procedura di valutazione dello slump:



Figura 3.1: Valutazione dello slump nella miscela MIX2

Di seguito vengono invece riportati i valori dello slump e del flow:

Slump test				
Slump [mm] 57				
Slump flow	D1 [mm]	166		
Siump now	D2 [mm]	166		

Tabella 3.8: Valori dello slump e del flow ottenuti per la miscela MIX2

I valori dello slump e del flow, come è possibile notare dalla Tabella 3.8 risultano superiori a quelli della miscela MIX1 e questo sta ad indicare che la miscela è risultata più fluida e caratterizzata da una maggiore lavorabilità rispetto la miscela del MIX1.

#### 3.1.3 Miscela MIX2BIS

La miscela MIX2BIS è stata realizzata partendo dal mix design della miscela MIX2 e modificando il solo contenuto di viscosizzante. La miscela MIX2, infatti, ha mostrato una stabilità molto buona ma, nella fase iniziale, anche una leggera difficoltà nella miscelazione; pertanto, si è deciso di ridurre leggermente il quantitativo di viscosizzante dal 5% al 2% in modo tale da provare a risolvere questa problematica. Inoltre, modificando un solo parametro tra una miscela e l'altra è possibile fare anche un confronto sull'effetto apportato da quel singolo ingrediente sul comportamento della miscela.

Vengono di seguito riportati i valori dei rapporti di progetto del mix design con la relativa ricetta della miscela MIX2BIS:

Tabella 3.9: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2BIS

Rapporti MIX2BIS						
sabbia/cemento acqua/cemento schiuma/cemento viscosizzante/cemento superfluidificante/cemento						
2,3	0,325	0,12	0,02	0,02		

Tabella 3.10: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2BIS

Ricetta MIX2BIS				
Componente	Peso [g]			
cemento	550			
sabbia fine (0÷2 mm)	1265			
acqua	178,75			

schiuma	66
viscosizzante	11
superfluidificante MASTEREASE	11
tensioattivo FOAMIN	

Durante la miscelazione, è stata subito evidente la maggiore facilità nella miscelazione apportata dalla riduzione del quantitativo di viscosizzante.

Terminata la miscelazione, la miscela ha iniziato a mostrare una leggera instabilità nella tenuta delle bolle, dovuta probabilmente ad una minore azione di confinamento esercitata dalla matrice cementizia ottenuta con un minor quantitativo di viscosizzante. Questo comportamento è evidenziato dalla maggiore differenza in termini di densità allo stato fresco tra la prima e la seconda valutazione, come riportato nella sezione successiva.

#### 3.1.3.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2BIS

Vengono riportati nella seguente tabella i valori della densità allo stato fresco valutati per la miscela MIX2BIS:

	Calcolo densità allo stato fresco				
	Volume [l]				
		1,04			
	Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g]				
	1511	1629	1642		
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 2 [kg/m3]	Densità 3 [kg/m3]		
	1547	1678	<b>1692</b>		
Incremento [%]		7,81	0,80		

Tabella 3.11: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2BIS

Dai valori della densità fresca calcolati per la miscela MIX2BIS, si è notato anche in questa miscela un leggero aumento tra la prima e la seconda valutazione, in questo caso pari al 7,81%, leggermente superiore rispetto quello riscontrato nella miscela MIX2 (4,31%), mentre, anche in questo caso, la miscela tendeva successivamente a stabilizzarsi mostrando solo un incremento pari allo 0,80% tra la seconda e la terza valutazione della densità allo stato fresco. Infine, è possibile notare che i valori della densità allo stato fresco. Infine, è possibile notare che i valori della densità allo stato fresco Infine, è dovuto alla presenza di un sistema cementizio meno consistente per via della diminuzione del rapporto viscosizzante cemento rispetto agli altri mix design.

# 3.1.3.2 Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2BIS



Viene di seguito riportata la foto che mostra la valutazione dello slump:

Figura 3.2: Valutazione dello slump nella miscela MIX2BIS

I valori dello slump e del flow valutati per la miscela MIX2BIS vengono di seguito riportati:

Slump test				
Slump [mm] 63				
Slump flow	D1 [mm]	191		
Siump now	D2 [mm]	194		

Tabella 3.12: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2BIS

La riduzione del quantitativo di viscosizzante rispetto quello introdotto nella miscela MIX2 ha portato, per come ci si aspettava, ad ottenere una miscela (MIX2BIS) caratterizzata da una maggiore fluidità; questo è possibile riscontrarlo sia attraverso un confronto visivo tra le foto relative ad alle due miscele (MIX2 e MIX2BIS), sia confrontando i valori dello slump presenti nelle rispettive tabelle.

#### 3.1.4 Miscela MIX3

Attraverso la realizzazione della miscela MIX3 è stato studiato l'effetto dovuto al cambiamento della tipologia di tensioattivo. Nelle precedenti miscele è stato utilizzato il tensioattivo proteico FOAMIN C mentre nella miscela MIX3 è stato utilizzato il tensioattivo ISOCEM, anch'esso a base proteica. Inoltre, nella miscela MIX3 è stata mantenuta la stessa quantità di viscosizzante utilizzata nella miscela MIX2BIS, quantità ridotta rispetto quella introdotta nella miscela MIX2; questo perché la miscela MIX2BIS è risultata migliore della miscela MIX2 in quanto non ha mostrato alcuna difficoltà durante la miscelazione, per cui, nei grandi volumi e nel caso in cui non debba essere utilizzata per la stampa 3D, sarebbe preferibile avere una miscela più facile da miscelare e più fluida, caratterizzata da una migliore stabilità delle bolle. Invece, per la stampa 3D servirebbe, al contrario, una miscela molto più viscosa, sebbene caratterizzata in egual modo da un'ottima stabilità del sistema di bolle d'aria.

Di seguito vengono riportate le tabelle relative ai rapporti di progetto del mix design della miscela MIX3 e della relativa ricetta:

Rapporti MIX3						
sabbia/cemento acqua/cemento schiuma/cemento viscosizzante/cemento superfluidificante/cement						
2,3	0,325	0,12	0,02	0,02		

Tabella 3.13: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX3

Tabella 3.14: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela
MIX3

Ricetta MIX3				
Componente	Peso [g]			
cemento	550			
sabbia fine (0÷2 mm)	1265			
acqua	178,75			
schiuma	66			
viscosizzante	11			
superfluidificante MASTEREASE	11			
tensioattivo ISOCEM				

#### 3.1.4.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX3

I valori della densità allo stato fresco vengono di seguito riportati:

	Calcolo densità allo stato fresco				
	Volume [l]				
	1,04				
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]		
	1404	1542	1577		
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]		
	1428	1583	<b>1620</b>		
Incremento [%]		9,83	2,27		

Tabella 3.15: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX3

Osservando i valori delle densità allo stato fresco relative alla miscela MIX3 si riscontra subito l'effetto positivo apportato sulle proprietà allo stato fresco della miscela utilizzando il tensioattivo ISOCEM piuttosto che il tensioattivo FOAMIN C.

Difatti, cambiando solamente il tensioattivo e mantenendo inalterato tutto il resto, la miscela MIX3 ha mostrato valori della densità allo stato fresco inferiori rispetto quelli ottenuti dalla miscela MIX2BIS.

Finora, nelle diverse miscele prodotte, è stata mantenuta inalterata la quantità di schiuma introdotta, quindi, quando la densità di una miscela allo stato fresco risulta essere inferiore alla densità allo stato fresco di un'altra miscela, a parità di schiuma introdotta, significa che il sistema è caratterizzato da migliori capacità schiumanti.

Quindi, sotto questo punto di vista, la miscela MIX3, è stata la migliore di tutte le precedenti miscele realizzate; bisogna però capire come variano le resistenze, in quanto anche la resistenza è associata alla densità. Considerando, ad esempio, una miscela con densità maggiore e con valori di resistenza più alti, può essere che la maggiore resistenza ottenuta è data proprio dalla maggiore densità della miscela e non dal fatto che il tensioattivo introdotto in tale miscela sia migliore. Invece quando il tensioattivo è nettamente migliore rispetto ad un altro, la miscela mostrerà valori di resistenza maggiori pur avendo una densità leggermente inferiore rispetto alla miscela di confronto; in tal caso, infatti, avremo maggiori valori di resistenza e densità più basse o al più uguali.

Anche in questo caso, come accaduto nelle precedenti miscele, la densità allo stato fresco tende inizialmente ad aumentare nel tempo, per poi stabilizzarsi. Questo fenomeno potrebbe anche essere correlato alla presenza della sola sabbia come aggregato fine; introducendo magari delle polveri più fini la miscela potrebbe stabilizzarsi prima.

# 3.1.4.2 Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX3

Viene di seguito riportata la foto fatta dopo aver eseguito la prova dello slump, in cui è possibile apprezzare la consistenza dell'impasto:



Figura 3.3: Valutazione dello slump nella miscela MIX3

Vengono di seguito riportati i valori dello slump e del flow valutati per la miscela MIX3:

Slump test				
Slump [mm] 60				
Churren filmur	D1 [mm]	185		
Slump now	D2 [mm]	185		

Tabella 3.1	16: Valori	dello slumi	o e del flow	/ della	miscela	MIX3
rubenu 5.	10. Vulon	acito statti		/ ucnu	miscelu	1411/13

#### 3.1.5 Miscela MIX4

L'obiettivo della miscela 4 e della successiva miscela 5 è stato quello di valutare l'effetto dell'introduzione, nella miscela, di sabbia più grossolana (sabbia granita) caratterizzata da un diametro massimo delle particelle pari a 4 mm mentre, quella utilizzata nelle precedenti miscele, era una sabbia caratterizzata da un diametro massimo delle particelle pari a 2 mm.

La miscela MIX4 differisce dalla miscela MIX3 solamente per la tipologia di sabbia utilizzata. In questo caso è stata utilizzata solamente la sabbia granita al posto della sabbia più fine; anche questa volta è stato modificato un solo parametro appositamente per capire l'influenza della tipologia di sabbia introdotta. Si è deciso di continuare ad utilizzare il tensioattivo Isocem in quanto ha portato, nella miscela fresca, risultati migliori.

Vengono di seguito riportati i valori dei rapporti utilizzati per il progetto del mix design della miscela MIX4 e la relativa ricetta:

Rapporti MIX4				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,325	0,12	0,02	0,02

Tabella 3.17: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX4

Tabella 3.18: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX4

Ricetta MIX4		
Componente	Peso [g]	
cemento	550	
sabbia granita (0÷4 mm)	1265	
acqua	178,75	
schiuma	66	
viscosizzante	11	
superfluidificante MASTEREASE	11	
tensioattivo ISOCEM		

Una volta eseguita la miscelazione di tutti gli ingredienti, si è subito notato che la miscela presentava delle bolle, con delle dimensioni più grandi rispetto al solito, in superficie e una notevole quantità di bolle instabili. Questo sta ad indicare che la miscela, inizialmente, era piuttosto instabile. Era inoltre necessario capire se i pezzi più grossi rimanessero in sospensione o andassero a depositarsi sul fondo del recipiente.

La miscela, inoltre, è subito apparsa piuttosto fluida; quindi, una sua eventuale ottimizzazione richiederebbe un aumento della viscosità, magari aumentando un po' il contenuto di viscosizzante introdotto nella miscela.

# 3.1.5.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX4

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX4 vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco		
		Volume [l]	
		1,04	
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]
	1489	1571	1640
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]
	1690	1788	1870
Incremento [%]		5,51	4,39

Tabella 3.19: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX4

Determinati i valori della resistenza allo stato fresco della miscela MIX4, si è notato, come è possibile riscontrare dai valori presenti nella Tabella 3.19, che la densità allo stato fresco tendeva sempre ad aumentare nel tempo, a differenza di quanto accaduto nelle precedenti miscele, in cui inizialmente la miscela presentava un aumento della densità e successivamente tendeva a stabilizzarsi, presentando un incremento trascurabile.

Quindi, l'utilizzo della sola sabbia granita ha portato ad ottenere un sistema che presentava, allo stato fresco, una notevole instabilità.

# 3.1.5.2 Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX4

Viene di seguito mostrata la foto, fatta subito dopo la prova dello slump, in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.4: Valutazione dello slump nella miscela MIX4

Come è possibile notare dalla Figura 3.4, la miscela MIX4 ha mostrato un'elevata fluidità e questo viene messo in luce dall'elevato valore dello slump ottenuto dalla prova. Inoltre, si è notato che la miscela, anche dopo aver eseguito il test dello slump, presentava ancora bolle di notevoli dimensioni in superficie.

Di seguito vengono riportati i valori dello slump valutato per la miscela MIX4:

Slump test			
Slump [mm]	70		
Slump flow	D1 [mm]	/	
	D2 [mm]	/	

Tabella 3.20: Valori dello slump e del flow della miscela MIX4

Il flow non è stato valutato per via dell'elevata fluidità della miscela.

Durante il confezionamento della miscela nei casseri metallici, è stato notato che la parte più pesante del materiale andava a depositarsi nel fondo, presentando in tal modo una notevole quantità di parte fluida in superficie. Il sistema era dunque caratterizzato da un significativo fenomeno di segregazione.

In base ai risultati ottenuti, risultava già possibile scartare questa tipologia di sabbia, in quanto la miscela ha presentato delle caratteristiche allo stato fresco estremamente peggiori rispetto quelle ottenute da tutte le altre miscele preparate fino a quel momento.

#### 3.1.6 Miscela MIX5

In questo caso, visto lo scarso risultato ottenuto con la precedente miscela MIX4, si è optato per il taglio delle sabbie; si è infatti deciso di ridurre il quantitativo di sabbia granita e di utilizzare quindi il 70% di sabbia fine, già utilizzata in tutte le miscele precedenti alla miscela MIX4, e il restante 30% di sabbia granita. Tutti gli altri componenti sono rimasti invariati rispetto la miscela MIX4.

Vengono di seguito riportati i rapporti utilizzati per il progetto del mix design della miscela MIX5 e la relativa ricetta:

Tabella 3.21: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX5

Rapporti MIX5				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,325	0,12	0,02	0,02

Tabella 3.22: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela
MIX5

Ricetta MIX5		
Componente	Peso [g]	
cemento	550	
sabbia fine (0÷2 mm)	885,5	
sabbia granita (0÷4 mm)	379,5	
acqua	178,75	
schiuma	66	
viscosizzante	11	
superfluidificante MASTEREASE	11	
tensioattivo ISOCEM		

Durante la fase di miscelazione la miscela MIX5 è subito sembrata più stabile rispetto la precedente miscela MIX4, nonostante qualche bolla continuasse, anche in questo caso, a collassare.

# 3.1.6.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX5

Vengono di seguito riportati i valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX5:

	Calcolo densità allo stato fresco		
		Volume [l]	
	1,04		
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]
	1522	1603	1662
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]
	1560	1648	1711
Incremento [%]		5,32	3,68

Tabella 3.23: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX5

Dai valori della densità fresca presenti nella Tabella 3.23, ottenuti per la miscela MIX5, si nota che, anche in questo caso, la miscela ha presentato un incremento della densità nel tempo, anche se leggermente inferiore rispetto alla precedente miscela (MIX4); questo sta ad indicare che la miscela, pur avendo ridotto il quantitativo della sabbia granita, continuava a mostrare segni di instabilità.

I valori della densità fresca ottenuti sono molto simili a quelli della miscela MIX3 e questo è un segnale positivo, in quanto stava ad indicare che tutto quello che era stato fatto risultava ripetibile.

# 3.1.6.2 Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX5

Dalla prova dello slump test, la miscela è apparsa anche in questo caso troppo fluida, come è possibile notare dalla seguente foto:



Figura 3.5: Valutazione dello slump nella miscela MIX5

Di seguito vengono riportati i valori dello slump e del flow valutati per la miscela MIX5:

Slump test			
Slump [mm]	67,5		
Slump flow	D1 [mm]	235	
	D2 [mm]	233	

Tabella 3.24: Valori dello slump e del flow della miscela MIX5

I valori dello slump e del flow appaiono molto elevati proprio per l'elevata fluidità della miscela. In questo caso, per cercare di ridurre la fluidità della miscela senza però alterare il rapporto acqua/cemento, altrimenti non sarebbe stato più possibile fare il confronto con le altre miscele realizzate, sarebbe necessario ridurre il quantitativo di superfluidificante e aggiungere magari anche un po' di viscosizzante per cercare di rendere la miscela più viscosa.
I valori dello slump risultano essere leggermente inferiori rispetto alla miscela precedente (MIX4) e leggermente superiori rispetto alla miscela MIX3; questo sta ad indicare che il problema dell'eccessiva fluidità che ha caratterizzato la miscela MIX4 e la miscela MIX5, è correlato alla tipologia di sabbia utilizzata, in quanto risulta essere l'unico parametro modificato rispetto la miscela MIX3.

## 3.1.7 Miscela MIX2ISOCEM

Da questo momento in poi la sperimentazione si è focalizzata sul miglioramento e sulla ottimizzazione della miscela che ha mostrato i migliori risultati, considerando sia le proprietà allo stato fresco che le proprietà meccaniche, rispetto alle altre miscele. Tra tutte le miscele precedentemente analizzate, quella che ha presentato le migliori prestazioni è stata la miscela MIX2. Si è quindi deciso inizialmente di studiare l'effetto della differente tipologia di tensioattivo nella miscela MIX2. Oltre al tensioattivo Foamin e al tensioattivo Isocem, utilizzati nelle precedenti miscele, è stato introdotto un terzo tensioattivo, denominato CBD, anch'esso di natura proteica.

La miscela MIX2ISOCEM presenta dunque lo stesso mix design della miscela MIX2, in cui è stato utilizzato il tensioattivo Isocem al posto del tensioattivo Foamin.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela MIX2ISOCEM e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.25: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2ISOCEM

Rapporti MIX2ISOCEM				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,325	0,12	0,05	0,02

Tabella 3.26: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2ISOLTECH

Ricetta MIX2ISOCEM			
Componente	Peso [g]		
cemento	550		
sabbia fine (0÷2 mm)	1265		
acqua	178,75		
schiuma	66		
viscosizzante	27,5		
superfluidificante MASTEREASE	11		
tensioattivo ISOCEM			

#### 3.1.7.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2ISOCEM

Vengono di seguito riportati i valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX2ISOCEM:

	Calcolo densità allo stato fresco			
	Volume [l]			
	1,04			
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]	
	1448	1554	1567	
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	
	1476	1593	1606	
Incremento [%]		7,32	0,84	

Tabella 3.27: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2ISOCEM

La prima pesata della miscela allo stato fresco ha riportato un peso piuttosto basso se paragonato ai pesi ottenuti dalle successive pesate. La miscela allo stato fresco ha subito un incremento tra la prima pesata e la seconda pesata pari al 7.32 %, per poi stabilizzarsi.

Confrontando i valori della densità allo stato fresco della miscela MIX2ISOCEM con quelli relativi alla miscela MIX2, si nota che il tensioattivo Isocem ha portato ad ottenere dei valori di densità inferiori; questo indica che il tensioattivo Isocem ha portato ad ottenere un sistema migliore dal punto di vista della tenuta della schiuma. Bisognerà poi fare un confronto con le proprietà meccaniche per determinare il tensioattivo migliore sotto tutti i punti di vista.

# 3.1.7.2 <u>Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2ISOCEM e del volume di</u> <u>materiale prodotto</u>

Viene di seguito riportata la foto, scattata subito dopo la prova di slump, dalla quale è possibile apprezzare la consistenza della miscela MIX2ISOCEM:



Figura 3.6: Valutazione dello slump nella miscela MIX2ISOCEM

Visivamente la miscela MIX2ISOCEM mostra una maggiore viscosità rispetto alla miscela MIX2.

I valori dello slump e del flow calcolati per la miscela MIX2ISOCEM vengono riportati nella seguente tabella:

Slump test				
Slump [mm] 57,3				
Churren filmur	D1 [mm]	156		
Siump now	D2 [mm]	154		

Tabella 3.28: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2ISOLTECH

Volume di materiale prodotto = 1370 ml

## 3.1.8 Miscela MIX2CBD

La miscela MIX2CBD presenta lo stesso mix design della miscela MIX2, nella quale è stato utilizzato il tensioattivo Cbd piuttosto che il tensioattivo Foamin.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela MIX2CBD e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.29: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2CBD

Rapporti MIX2CBD				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,325	0,12	0,05	0,02

Tabella 3.30: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2COBOD

Ricetta MIX2CBD	
Componente	Peso [g]
cemento	550
sabbia fine (0÷2 mm)	1265
acqua	178,75
schiuma	66
viscosizzante	27,5
superfluidificante MASTEREASE	11
tensioattivo CBD	

#### 3.1.8.1 Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2CBD

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX2CBD vengono riportati nella seguente tabella:

Tabella 3.31: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2CBD

	Calcolo densità allo stato fresco				
	Volume [l]				
	1,04				
	Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g]				
	1475	1576	1601		
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]		
	1460	1568	1593		
Incremento [%]		6,85	1,59		

Anche in questa miscela viene riscontrato lo stesso comportamento riscontrato nella precedente miscela e in quasi tutte le altre miscele realizzate: la miscela subisce inizialmente un incremento della densità allo stato fresco, pari in questo caso al 6,85 %, per poi stabilizzarsi successivamente nel tempo.

I valori della densità allo stato fresco si rivelano inferiori rispetto quelli relativi alla miscela MIX2, risultando ancora inferiori a quelli ottenuti dalla miscela MIX2ISOCEM. In generale, è possibile quindi affermare che i tensioattivi Isocem e Cbd, hanno entrambi

un migliore potere schiumante, in quanto riescono a fare abbassare maggiormente la densità del materiale.

# 3.1.8.2 <u>Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2CBD e del volume di</u> <u>materiale prodotto</u>

In questo caso la miscela MIX2CBD mostra una consistenza più simile a quella del MIX2 che a quella della miscela precedente (MIX2ISOCEM):



Figura 3.7: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD

I valori dello slump e flow valutati per la miscela MIX2CBD vengono riportati nella seguente tabella:

Slump test				
Slump [mm] 57,2				
Churren filmur	D1 [mm]	250		
Siump now	D2 [mm]	250		

Taballa 2 22		clump o	dal flow	dalla	miccola	
Tabella 5.52	. valori uello	siump e	uernow	uena	IIIIscela	IVIIAZUDU

Come viene messo in evidenza dai valori presenti nella Tabella 3.32, nella miscela MIX2CBD i valori flow risultano più elevati se confrontati a quelli ottenuti nella miscela MIX2ISOCEM e questo sicuramente è un punto a favore per il tensioattivo Cbd nei

confronti dell'Isocem, in quanto l'obiettivo, in questa fase del lavoro di ricerca, era quello di ottenere, a parità di densità, una miscela maggiormente lavorabile.

Anche in questo caso è stata valutata la quantità di materiale prodotto, determinandone il volume:

Volume di materiale prodotto = 1350 ml

#### Miscela MIXCBD DMAX025

La fase successiva è stata quella di studiare l'effetto della tipologia di sabbia utilizzata in termini di dimensione massima delle particelle; è stato quindi eseguito il taglio della curva granulometrica della sabbia mediante setacciatura andando a produrre due differenti tipologie di sabbia, una caratterizzata da un diametro massimo delle particelle pari a 0,25 mm e un'altra la cui dimensione massima delle particelle era pari a 0,5 mm. In tal modo, partendo dalla miscela MIX2, sono state realizzate altre due miscele, utilizzando le due differenti tipologie di sabbia e sostituendole alla sabbia con diametro massimo pari a 2 mm; gli altri componenti sono rimasti invariati. Da questo momento in poi si è deciso di utilizzare il tensioattivo Cbd in quanto, dalla preparazione delle precedenti miscele, è stato quello che ha portato ad ottenere le migliori condizioni allo stato fresco.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela MIX2CBD\_DMAX025 e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Rapporti MIX2CBD_DMAX025				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,325	0,21	0,05	0,02

Tabella 3.33: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela
MIX2CBD_DMAX025

Tabella 3.34: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2COBOD\_DAMX025

Ricetta MIX2CBD_DMAX025	
Componente	Peso [g]
cemento	550
sabbia fine (Dmax = 0,25 mm)	1265
acqua	178,75
schiuma	116

viscosizzante	27,5
superfluidificante MASTEREASE	11
tensioattivo CBD	

Durante la miscelazione la miscela è risultata difficilmente miscelabile, si è quindi deciso di aumentare il contenuto di schiuma di 20 g, aggiungendo in tal modo una quantità totale di schiuma pari a 86 g. Aggiunti i 20 g di schiuma, la miscela non risultava ancora facilmente miscelabile (quasi miscelabile) per cui è stato deciso di introdurre ulteriori 30 g di schiuma, arrivando pertanto ad introdurre una quantità totale di schiuma pari a 106 g. Aggiunti gli ulteriori 30 g di schiuma, la miscela risultava quasi miscelabile. Per mantenere inalterato il quantitativo di schiuma a 66 g, si sarebbero potuti aggiungere acqua o superfluidificante. Terminata la miscelazione, il materiale che ne è venuto fuori era un calcestruzzo ad alta densità, stampabile; è stato quindi realizzato un calcestruzzo schiumato caratterizzato da una consistenza a tenuta plastica. Il calcestruzzo schiumato ottenuto risultava assolutamente stampabile e con solo il 5% di stabilizzante; solitamente ne serve di più, circa il 10%.

La miscela era inoltre caratterizzata da bolle di dimensioni ridottissime.

## Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2CBD DAMX025

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX2CBD\_DMAX025 vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco		
	Volume [l]		
		1,04	
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]
	1843,93	0	0
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]
	1920,88	/	/
Incremento [%]		/	/

Tabella 3.35: Valori della densità allo	stato fresco calcolati relativi alla miscela
MIX2CBD	_DMAX025

## Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2CBD DMAX025

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.8: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD\_DMAX025

La miscela ha mantenuto quasi inalterata la forma conferita dal cilindro, utilizzato per eseguire la prova di slump, in cui era contenuta; è possibile averne un riscontro anche dai valori bassissimi dello slump e del flow che sono riportati nella seguente tabella:

Slump test			
Slump [mm]	5,7		
Churren flaur	D1 [mm]	75,8	
Siump now	D2 [mm]	75,4	

Taballa 2 26: Valari dall	o clump o		miccola		
Tabella 5.50. Valori dell	o siump e	w uena i	illiscela	IVIIAZCOBOD_	

#### Miscela MIX2CBD DMAX05

Questa miscela è stata realizzata partendo dal mix design della miscela precedente (MIX2CBD\_DMAX025) e sostituendo alla sabbia con diametro massimo delle particelle pari a 0,25 mm, la sabbia con diametro massimo delle particelle pari a 0,5 mm. Tenendo in considerazione la difficoltà nella miscelazione riscontrata nella miscela precedente (MIX2CBD\_DMAX025) è stato inoltre aumentato il contenuto del superfluidificante al 4 % rispetto al peso del cemento in modo tale da mantenere inalterato il contenuto di schiuma pari a 66 g.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela MIX2CBD\_DMAX05 e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.37: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2CBD\_DMAX05

Rapporti MIX2CBD_DMAX05				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,325	0,12	0,05	0,04

Ricetta MIX2CBD_DMAX05		
Componente	Peso [g]	
cemento	550	
sabbia fine (Dmax = 0,5 mm)	1265	
acqua	178,75	
schiuma	66	
viscosizzante	27,5	
superfluidificante MASTEREASE	22	
tensioattivo CBD		

Tabella 3.38: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2CBD\_DMAX05

Dopo una prima miscelazione, la miscela è apparsa più fluida rispetto alla precedente, quindi non stampabile. Dopo un'ulteriore miscelazione, la miscela è risultata stabile con la presenza di bolle molto piccole, simili a quelle ottenute nelle miscele precedenti al taglio della curva granulometrica della sabbia. Quello che bisognava migliorare riguardava l'eccessiva difficoltà nella miscelazione prima di introdurre la schiuma e questo problema sarebbe stato possibile risolverlo aggiungendo magari un altro po' d'acqua prima di introdurre la schiuma. La miscela comunque risultava ben coesa.

## Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2CBD DAMX05

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX2CBD vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco			
	Volume [l]			
		1,04		
	Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]	
	1783,44	1916,44	1926,89	
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	
	1783	1927	1937	
Incremento [%]		7,46	0,55	

Tabella 3.39: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2CBD\_DMAX05

La miscela ha presentato inizialmente un incremento della densità pari al 7,46 %; dopo una successiva miscelazione e pesatura, la miscela si è stabilizzata presentando un incremento della densità trascurabile.

#### Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2CBD DMAX05

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.9: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD\_DMAX05

La seguente tabella mostra i valori dello slump e del flow valutati per la miscela MIX2CBD\_DMAX05:

Slump test			
Slump [mm]		53,7	
Slump flow	D1 [mm]	non valutato	
Siump now	D2 [mm]	non valutato	

Tabella 3.40: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2CBD\_DMAX05

Il valore dello slump indicato nella Tabella 3.40 non risulta tanto attendibile in quanto, durante lo sfilamento del cilindro, parte del materiale è rimasto attaccato al cilindro e questo, di certo, compromette un po' il risultato. Per tale motivo, il flow non è stato valutato, in quanto non sarebbe stato tanto attendibile.

#### Miscela MIX2CBD025\_OTT+T

L'obiettivo prefissato in questa fase della ricerca è stato quello di risolvere il problema dell'aumento della densità fresca nel tempo che si è verificato praticamente in quasi tutte le miscele realizzate, partendo dalla miscela MIX2CBD\_DAMX025 e cercando quindi di ottimizzarla. Per risolvere questo problema le strade da provare erano essenzialmente due:

- 1. Incrementare il quantitativo di tensioattivo, aggiungendo magari il tensioattivo aggiuntivo in forma liquida direttamente nella miscela
- 2. Aumentare la fase fluida

Si è scelto di iniziare dall'incremento della fase fluida, aumentando il contenuto di acqua da introdurre nella miscela e quindi incrementando il rapporto acqua/cemento ad un valore pari a 0,35. È stato inoltre incrementato il quantitativo del superfluidificante al 3,5 % rispetto al peso del solo cemento, mantenendolo inferiore al 4 % (quantitativo utilizzato nella miscela precedente); in questo modo, un valore non tanto elevato del superfluidificante (< 4 %) consentirebbe, nel caso dell'aggiunta di additivi in polvere nelle future miscele, di poterne incrementare il quantitativo per poter rendere più fluida la miscela, non oltrepassando in tal modo il valore massimo consigliato pari al 5 – 6 % rispetto al peso del cemento.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela MIX2CBD025\_OTT+T e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.41: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2CBD025\_OTT+T

Rapporti MIX2CBD025_OTT+T					
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento	
2,3	0,45	0,12	0,05	0,035	

Tabella 3.42: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2COBOD025\_OTT+T

Ricetta MIX2CBD025_OTT+T			
Componente Peso [g]			
cemento	550		
sabbia fine (Dmax = 0,25 mm)	1265		
acqua	247,5		
schiuma	66		

viscosizzante	27,5
superfluidificante MASTEREASE	19,25
tensioattivo CBD	0,5 % libero

Durante la miscelazione si è visto che la miscela non riusciva a legare e quindi non si creava la situazione ideale per poter accogliere la schiuma; è stato pertanto deciso di aggiungere un altro po' d'acqua alla miscela con un po' di tensioattivo libero, aggiunto direttamente nell'acqua. La quantità di acqua aggiunta è stata pari a 27,5 g, ovvero pari al 5 % del peso del cemento mentre la quantità di tensioattivo libero aggiunta è stata pari a 2,75 g, ovvero pari allo 0.5 % del peso del cemento. Una volta ripresa la miscelazione, è stato riscontrato che la miscela non riusciva ancora a legare; pertanto, si è stabilito di aggiungere ancora acqua, pari al 5 % del peso del cemento, quindi ulteriori 27,5 g. In questo modo, la quantità totale di acqua introdotta nella miscela è stata pari a 247,5 g, raggiungendo un rapporto acqua/cemento pari a 0,45. Ripresa la miscelazione, la miscela è apparsa più umida ma ancora non tanto legata; si è comunque deciso di introdurre la schiuma. La miscela è apparsa subito differente dalle altre volte, con una consistenza soffice e spumosa:



Figura 3.10: Consistenza della miscela MIX2CBD025\_OTT+T subito dopo la miscelazione

#### Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2CBD025 OTT+T

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX2CBD vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco			
	Volume [l]			
	1,04			
	Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g]			
	1579,37 1528,48 1499,24			
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	
	1780	1725	<b>1692</b>	
Incremento [%]		-3,22	-1,91	

Tabella 3.43: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2CBD025\_OTT+T

Conclusa la prima miscelazione, l'impasto ha presentato una leggera instabilità notata dal fatto che alcune bolle scoppiavano; dopo la seconda miscelazione l'impasto è sembrato fin da subito più stabile. In questo caso, dopo la seconda miscelazione, è stato rilevato un fenomeno molto interessante che non era ancora mai accaduto in tutte le precedenti miscele realizzate: nella seconda pesata il peso è risultato inferiore al primo, c'è stata quindi una riduzione della densità piuttosto che un aumento.

La miscela è apparsa un po' grumosa e questo è un aspetto che dovrebbe essere migliorato, in quanto l'ideale sarebbe avere una miscela stabile ma priva di grumi che, come detto, possono inficiare le proprietà della miscela allo stato indurito.

Alla terza pesata il peso si era nuovamente ridotto, quindi la miscela si stabilizzava sempre più con il passare del tempo; non è stato più notato infatti, scoppiare alcuna bolla. La presenza del tensioattivo liquido disperso nella fase cementizia assicura la presenza di molecole disperse nel sistema che possono portare alla formazione di nuove bolle d'aria durante la fase di miscelazione caratterizzate da un'ottima stabilità per via dell'effetto stabilizzante noto nella letteratura di riferimento come effetto Gibbs-Marangoni.

#### Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2CBD025 OTT+T

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.11: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD025\_OTT+T

La seguente tabella mostra i valori dello slump e del flow valutati per la miscela MIX2CBD025\_OTT+T:

Slump test			
Slump [mm] 38,35			
Slump flow	D1 [mm]	115	
Slump now	D2 [mm]	115	

Tabella 3.44: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2CBD025\_OTT+T

La miscela è risultata molto lavorabile e questo è dovuto all'elevata presenza delle bolle che favoriscono lo scorrimento del materiale cementizio.

#### Miscela MIX2CBD025 OTT

Con la seguente miscela si è cercato di capire se l'effetto stabilizzante fosse stato conferito dall'aggiunta di tensioattivo libero nella miscela oppure dal solo incremento della fase fluida. Per fare questo, è stata realizzata la presente miscela caratterizzata dallo stesso mix design della precedente eccetto per l'aggiunta di tensioattivo libero,

che non è stato quindi introdotto; quindi, rispetto alla miscela MIX2CBD\_DAMX025, è stata aumentata solamente la fase fluida.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela MIX2CBD025 OTT e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.45: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela
MIX2CBD025_OTT

Rapporti MIX2CBD025_OTT				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,45	0,12	0,05	0,035

Tabella 3.46: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2CBD025\_OTT

Ricetta MIX2CBD025_OTT	
Componente	Peso [g]
cemento	550
sabbia fine (Dmax = 0,25 mm)	1265
acqua	247,5
schiuma	66
viscosizzante	27,5
superfluidificante MASTEREASE	19,25
tensioattivo CBD	

Dopo la miscelazione, la miscela è apparsa più stabile rispetto alla precedente. Questo significava che c'era ripetibilità in quello che era stato fatto, anche togliendo quel po' di tensioattivo libero aggiunto.

## Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2CBD025 OTT

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX2CBD vengono riportati nella seguente tabella:

## Tabella 3.47: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2CBD025\_OTT

Calcolo densità allo stato fresco				
Volume [l]				
1,04				
Peso 1 [g]	Peso 2 [g]	Peso 3 [g]	Peso 4 [g]	
1670,6 1636,25 1670 1684,48				
Densità 1 [kg/m3]	Densità 2 [kg/m3]	Densità 3 [kg/m3]	Densità 4 [kg/m3]	
1796	1760	1797	1813	

Incremento [%]	-2,06	2,06	0,87

Dalla prima densità calcolata si è notato che essa risultava maggiore rispetto alla prima densità calcolata nella precedente miscela; questo può essere dovuto al fatto che la schiuma, che è stata aggiunta in questa miscela, era caratterizzata da una densità leggermente superiore (la densità della schiuma impiegata durante tutta la campagna sperimentale si attesta sui  $90\pm10$  g/l; in questo caso la densità).

Anche in questo caso, la seconda pesata ha mostrato un peso inferiore al primo, quindi questo sta ad indicare che quel tensioattivo libero aggiunto nella precedente miscela in realtà non è necessario per guadagnare stabilità nella miscela, in quanto con il solo aumento della fase fluida si ottiene già una stabilizzazione della miscela.

Miscelando nuovamente ed effettuando un'altra pesata, è stato riscontrato un leggero aumento del peso; quindi, questa miscela rispetto alla precedente, ha perso un po' di stabilità nel tempo, cioè questo impasto tende a mantenersi stabile mentre quello precedente continuava a guadagnare sempre più stabilità nel tempo. Questo è proprio dovuto al migliore effetto Gibbs-Marangoni nel caso di aggiunta di tensioattivo liquido nella miscela. A questo punto, era necessario capire se la miscela continuava ad incrementare la densità nel tempo oppure si manteneva stabile e per far questo si è effettuata un'ulteriore pesata. Dalla quarta pesata si è riscontrato un ulteriore, ma piccolo, aumento del peso, che è possibile considerare trascurabile. In tal modo, si è compreso che la miscela si manteneva stabile nel tempo.

In questo modo è stato possibile capire l'effetto riscontrato nella precedente miscela, ovvero la riduzione della densità nel tempo; questo era dovuto al tensioattivo libero aggiunto, perché riusciva ad inglobare ulteriore aria durante ogni singola miscelazione tra una pesata e l'altra e, visto che c'erano tante molecole di tensioattivo libere, esse andavano non solo ad equilibrare le nuove superfici di formazione (grazie al già richiamato effetto Gibbs-Marangoni) ma permettevano anche che se ne formassero di più.

Quindi, in conclusione, si è capito che aumentando un po' il quantitativo di acqua e quindi la fase fluida nella miscela, si otteneva un miglioramento della stabilità, ovvero, non si presentava più quell'incremento della densità a breve termine; inoltre, aggiungendo un po' di tensioattivo libero nella miscela, si ottiene addirittura un decremento della densità nel tempo.

#### Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2CBD025 OTT

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.12: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CBD025\_OTT

La seguente tabella mostra i valori dello slump e del flow valutati per la miscela MIX2CBD025\_OTT:

Slump test			
Slump [mm]	35,1		
Slump flow	D1 [mm]	114	
Siump now	D2 [mm]	114	

Tabella 3.48: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2CBD025\_OTT

I valori dello slump e del flow sono davvero vicini ai valori ottenuti nella miscela precedente.

## Miscela MIX2CBD025 O A/C0,5

Questa miscela è stata realizzata per ottimizzare la precedente miscela, in particolare per migliorare la miscelazione nella fase iniziale, in quanto presentava ancora delle difficoltà. Per fare questo, è stato aumentato il rapporto acqua cemento ad un valore pari a 0,5. Tutti gli altri componenti sono stati mantenuti uguali a quelli della precedente miscela (MIX2CBD025\_OTT). Non è stato quindi aggiunto in questo caso il tensioattivo libero nella miscela.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela MIX2CBD025\_O\_A/C0,5 e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.49: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela MIX2CBD025\_O\_A/C0,5

Rapporti M2CBD025_O_A/C0,5				
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento
2,3	0,5	0,12	0,05	0,035

Tabella 3.50: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela MIX2CDB025\_O\_A/C0,5

Ricetta M2CBD025_O_A/C0,5	
Componente	Peso [g]
cemento	521,74
sabbia fine (Dmax = 0,25 mm)	1200
acqua	260,87
schiuma	62,61
viscosizzante	26,09
superfluidificante MASTEREASE	18,26
tensioattivo CBD	

I pesi di tutti i vari ingredienti risultano inferiori a quelli utilizzati nella miscela precedente perché la quantità di sabbia con diametro massimo pari a 0,25 mm disponibile non era sufficiente per raggiungere la quantità pari a 1,236 kg; si è quindi deciso di utilizzare 1,2 kg di sabbia e di proporzionare i quantitativi di tutti gli ingredienti del mix design a tale quantità di sabbia.

Eseguita la miscelazione, la miscela è apparsa facilmente miscelabile ma non liquida. La miscela presentava, inoltre, una maggiore morbidezza pur non avendo aggiunto il tensioattivo libero.

Alla fine, è stato aggiunto un quantitativo di schiuma pari a 60 g e non pari a 62,61 g in quanto, durante la miscelazione, è stato notato che un'ulteriore quantità di schiuma, oltre i 60 g, sarebbe stata eccessiva, risultando in una densità finale fin troppo bassa.

## Valutazione della densità allo stato fresco della miscela MIX2CDB025 O A/C0,5

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela MIX2CDB025\_O\_A/C0,5 vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco			
	Volume [l]			
	1,04			
	Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g]			
	1613,05 1633 1639,04			
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	Densità 1 [kg/m3]	
	1713	1735	1741	
Incremento [%]		1,24	0,37	

Tabella 3.51: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela MIX2CDB025\_O\_A/C0,5

Nella miscela non sono state osservate bolle scoppiare ma è stata notata la presenza di qualche grumo.

Come è possibile notare dalla Tabella 3.51, la densità allo stato fresco della miscela ha subito un piccolo incremento nel tempo che può essere considerato trascurabile; pertanto, la miscela MIX2CDB025\_O\_A/C0,5 è risultata essere piuttosto stabile.

# Valutazione dello slump e del flow della miscela MIX2CDB025 O A/C0,5

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.13: Valutazione dello slump nella miscela MIX2CDB025\_O\_A/C0,5

La seguente tabella mostra i valori dello slump e del flow valutati per la miscela MIX2CDB025\_O\_A/C0,5:

Slump test			
Slump [mm] 51,2			
Clump flow	D1 [mm]	156,25	
Siump now	D2 [mm]	155.3	

Tabella 3.52: Valori dello slump e del flow della miscela MIX2CDB025\_O\_A/C0,5

## Miscela M2CDB05 O A/C0,45

La presente miscela è stata realizzata con l'obiettivo di creare una miscela stabile utilizzando anche la sabbia con diametro massimo pari a 0,5 mm. Per fare questo, è stata presa come punto di partenza la miscela MIX2CBD\_DMAX05, che è stata poi ottimizzata. Per ottimizzarla si è deciso di utilizzare la stessa strategia già adottata nella fase di ottimizzazione della miscela MIX2CBD\_DMAX025, ovvero:

• Aumento del contenuto di acqua

- Aumento del superfluidificante
- Aggiunta di tensioattivo libero nella miscela

In realtà, in questo caso, il quantitativo di superfluidificante è stato ridotto rispetto alla miscela MIX2CBD\_DMAX05. Nella miscela MIX2CBD\_DMAX025, si aveva un quantitativo di superfluidificante pari al 2 % rispetto al peso del cemento, che è stato incrementato al 3,5 % nella miscela ottimizzata (MIX2CBD025\_OTT+T); in questo caso, invece, la miscela MIX2CBD\_DMAX05 aveva già un contenuto elevato di superfluidificante pari al 4 % rispetto al peso del cemento, motivo per il quale si è deciso di diminuirlo, portandolo al 3,5 % rispetto al peso del cemento.

Il rapporto acqua/cemento è stato incrementato ad un valore pari a 0,45 ed è stato inoltre introdotta una quantità di tensioattivo libera pari allo 0,25 % rispetto al peso del cemento (quindi 1,275 g, pari alla metà di quella introdotta nella miscela MIX2CBD025\_OTT+T).

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela M2CBD05\_O\_A/C0,45 e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

## Tabella 3.53: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela M2CBD05\_O\_A/C0,45

Rapporti M2CBD05_O_A/C0,45					
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento	
2,3	0,45	0,12	0,05	0,035	

Tabella 3.54: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela M2CBD05\_O\_A/C0,45

Ricetta M2CBD05_O_A/C0,45				
Componente Peso [g]				
cemento	550			
sabbia fine (Dmax = 0,5 mm)	1265			
acqua	247,5			
schiuma	66			
viscosizzante	27,5			
superfluidificante MASTEREASE	19,25			
tensioattivo CBD	0,25% libero			

# Valutazione della densità allo stato fresco della miscela M2CBD05 O A/C0,45

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela M2CBD05\_O\_A/C0,45 vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco				
	Volume [l]				
	1,04				
	Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g]				
	1410,72 1504,5 1590,16				
	Densità 1 [kg/m3] Densità 1 [kg/m3] Densità 1 [kg/m3]				
	1472 1577 1672				
Incremento [%]		6,65	5,69		

Tabella 3.55: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela M2CBD05\_O\_A/C0,45

Dopo la miscelazione, la miscela ha presentato una buona fluidità.

Come si evince dalla Tabella 3.55, la miscela ha subito un incremento sostanziale della densità nel tempo; è risultata quindi piuttosto instabile. Questo vuol dire che utilizzando una sabbia con un diametro delle particelle più grande sorgono problemi nella miscela legati alla stabilità; probabilmente servirebbe una maggiore quantità di tensioattivo.

## Miscela M2CBD05 02

La presente miscela è stata realizzata per cercare di migliorare la precedente miscela (M2CBD05\_O\_A/C0,45), risultata alquanto instabile.

Si è cercato di ottenere un guadagno di stabilità, provando a ridurre leggermente il contenuto d'acqua, raggiungendo un valore del rapporto acqua/cemento pari a 0,425, e aumentando il quantitativo di tensioattivo libero introdotto nella miscela allo 0,5 % rispetto al peso del cemento (2,75 g).

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela M2CBD05\_02 e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.56: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela M2CBD05\_O2

Rapporti M2CBD05_O2					
sabbia/cemento	acqua/cemento	schiuma/cemento	viscosizzante/cemento	superfluidificante/cemento	
2,3	0,425	0,12	0,05	0,035	

Ricetta M2CBD05_O2				
Componente	Peso [g]			
cemento	550			
sabbia fine (Dmax = 0,5 mm)	1265			
acqua	233,75			
schiuma	66			
viscosizzante	27,5			
superfluidificante MASTEREASE	19,25			
tensioattivo CBD	0,5% libero			

Tabella 3.57: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela M2CBD05\_O2

A miscelazione avvenuta, la miscela sembrava essere più leggera rispetto alla precedente miscela e non tanto stabile.

## Valutazione della densità allo stato fresco della miscela M2CBD05 02

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela M2CBD05\_O2 vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco						
	Volume [l]						
	1,04						
	Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g] Peso 4 [g]						
	1190	1278	1277,26	1306,21			
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 2 [kg/m3]	Densità 3 [kg/m3]	Densità 4 [kg/m3]			
	1288	1391	1390	1422			
Incremento [%]		7,39	-0,06	2,27			

Tabella 3.58: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela M2CBD05\_O2

Come si nota dalla Tabella 3.58, la miscela ha presentato valori molto bassi del peso, soprattutto nella prima pesata, risultando la miscela più leggera realizzata fino a quel momento. La riduzione così eccessiva del peso era dovuta all'aggiunta di tensioattivo libero, portando alla formazione di schiuma aggiuntiva durante la miscelazione.

La miscela ha dunque presentato un'instabilità iniziale, come è possibile riscontrare dai primi due valori di densità calcolati, per poi stabilizzarsi successivamente. Tale instabilità non veniva riscontrata utilizzando la sabbia più fine (diametro massimo pari a 0,25 mm); pertanto, il diametro massimo della sabbia utilizzata influisce sulla stabilità della miscela e, al diminuire del diametro, si ottiene un miglioramento della stabilità.

# Valutazione dello slump e del flow della miscela M2CBD05 02

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.14: Valutazione dello slump nella miscela M2CBD05\_02

La seguente tabella mostra i valori dello slump e del flow valutati per la miscela M2CBD05\_02:

Slump test				
Slump [mm] 53,1				
Churren flaur	D1 [mm]	157,6		
Siump now	D2 [mm]	158,6		

Tabella 3.59: Valori dello slump e del flow della miscela M2CBD05\_02

# Miscela M2CBD025 1,8 OTT+T

Quest'ultima parte della fase sperimentale è stata incentrata sull'influenza della quantità di sabbia introdotta nella miscela sulle proprietà meccaniche. Le ultime due

miscele sono infatti state realizzate modificando, a parità del contenuto di cemento, il contenuto di sabbia, variando in tal modo il rapporto sabbia/cemento. Per il progetto della seguente miscela è stata presa come riferimento la miscela M2CBD025\_OTT, in cui è stato ridotto il valore del rapporto sabbia/cemento a 1,8; inoltre, è stato ridotto il quantitativo di acqua, riducendo pertanto il valore del rapporto acqua/cemento a 0,4 poiché, al diminuire del rapporto sabbia/cemento la miscela sarebbe già dovuta risultare più lavorabile. Infine, è stata aggiunta una quantità di tensioattivo libero nella miscela pari allo 0,25 % rispetto al peso del cemento; questo perché, tra tutte le miscele ottimizzate in cui è stata utilizzata la sabbia con un diametro massimo delle particelle pari a 0,25 mm, quella in cui è stato aggiunto il tensioattivo libero è risultata più stabile, presentando addirittura un incremento della stabilità nel tempo.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela M2CBD025\_1,8\_OTT+T e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

Tabella 3.60: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscel
M2CBD025_1,8_OTT+T

Rapporti M2CBD025_1,8_OTT+T					
sabbia/cemento acqua/cemento schiuma/cemento viscosizzante/cemento superfluidificante/ceme					
1,8	0,4	0,12	0,05	0,035	

#### Tabella 3.61: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela M2CBD025\_1,8\_OTT+T

Ricetta M2CBD025_1,8_OTT+T				
Componente Peso [g]				
cemento	550			
sabbia fine (Dmax = 0,5 mm)	990			
acqua	220			
schiuma	66			
viscosizzante	27,5			
superfluidificante MASTEREASE	19,25			
tensioattivo CBD	0,25% libero			

# Valutazione della densità allo stato fresco della miscela M2CBD025 1,8 OTT+T

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela M2CBDOB05\_02 vengono riportati nella seguente tabella:

	Calcolo densità allo stato fresco						
	Volume [l]						
	1,04						
	Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g] Peso 4 [g]						
	1402,68	1486,86	1495,15	1497,42			
	Densità 1 [kg/m3]	Densità 2 [kg/m3]	Densità 3 [kg/m3]	Densità 4 [kg/m3]			
	1464	1557	1566	1568			
Incremento [%]		6,00	0,56	0,15			

#### Tabella 3.62: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela M2CBD025\_1,8\_OTT+T

La miscela, eseguita la miscelazione, sembrava visivamente stabile mentre non è apparsa la stessa cosa dalla valutazione della densità allo stato fresco: la miscela ha presentato un incremento iniziale della densità, tra la prima e la seconda valutazione, per poi stabilizzarsi. Quello che ci si aspettava era invece una miscela che avesse una maggiore stabilità.

# Valutazione dello slump e del flow della miscela M2CBD025 1,8 OTT+T

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.15: Valutazione dello slump nella miscela M2CBD025\_1,8\_OTT+T

La seguente tabella mostra i valori dello slump e del flow valutati per la miscela M2CBD025\_1,8\_OTT+T:

Tabella 3.63: Valo	ori dello slump e	del flow della	miscela M2CBD02	5 1,8 OTT+T

Slump test			
Slump [mm] 48,35			
Slump flow	D1 [mm]	134,7	
	D2 [mm]	140,2	

Volume di materiale prodotto = 636  $cm^3$  circa

## Miscela M2CBD025 1,5 OTT+T

In questa ultima miscela è stato nuovamente ridotto il rapporto sabbia/cemento raggiungendo un valore pari a 1,5. La precedente miscela (M2CBD025\_1,8\_OTT+T) non ha mostrato la stabilità attesa; pertanto, in questa miscela, è stato deciso di aumentare il contenuto di tensioattivo libero allo 0,5 % rispetto al peso del cemento. Inoltre,

rispetto la precedente miscela, è stato un po' ridotto il rapporto acqua/cemento, mediante una riduzione proporzionale alla riduzione del rapporto sabbia/cemento. Il nuovo valore del rapporto acqua/cemento utilizzato nella presente miscela, calcolato quindi mediante una proporzione, è stato pari a 0,37.

Di seguito vengono riportati i rapporti che caratterizzano il mix design della miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T e la relativa ricetta con tutti i dosaggi utilizzati per ogni componente:

#### Tabella 3.64: Valori dei rapporti di progetto del mix design relativi alla miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T

Rapporti M2CBD025_1,5_OTT+T				
sabbia/cemento acqua/cemento schiuma/cemento viscosizzante/cemento superfluidificante/cement				
1,5	0,37	0,12	0,05	0,035

Tabella 3.65: Ingredienti e quantità introdotta di ogni singolo componente della miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T

Ricetta M2CBD025_1,5_0	TT+T
Componente	Peso [g]
cemento	550
sabbia fine (Dmax = 0,5 mm)	825
acqua	203,5
schiuma	66
viscosizzante	27,5
superfluidificante MASTEREASE	19,25
tensioattivo CBD	0,5% libero

## Valutazione della densità allo stato fresco della miscela M2CBD025 1,5 OTT+T

I valori della densità allo stato fresco calcolati per la miscela M2CBDOB05\_02 vengono riportati nella seguente tabella:

Tabella 3.66: Valori della densità allo stato fresco calcolati relativi alla miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T

Calcolo densità allo stato fresco				
Volume [l]				
1,04				
Peso 1 [g] Peso 2 [g] Peso 3 [g] Peso 4 [g]				
1276,06 1336,22 1356,39 1365,67				
Densità 1 [kg/m3] Densità 2 [kg/m3] Densità 3 [kg/m3] Densità 4 [kg/m3]				

	1357	1424	1446	1456
Incremento [%]		4,71	1,51	0,68

Eseguita la miscelazione, la miscela è apparsa visivamente stabile e molto pastosa. Durante la fase di valutazione della densità allo stato fresco, come è possibile notare dai valori riportati nella Tabella 3.66, la miscela si è presentata un po' instabile nella fase iniziale, tra la prima e la seconda pesata, per poi stabilizzarsi successivamente.

La miscela, inoltre, è stata caratterizzata da bassi valori di densità allo stato fresco; questo è dovuto al minore contenuto di sabbia introdotta nella miscela e quindi, alla riduzione del rapporto sabbia/cemento.

## Valutazione dello slump e del flow della miscela M2CBD025 1,5 OTT+T

Viene di seguito riportata la foto scattata subito dopo la prova dello slump in cui è possibile apprezzare la consistenza della miscela:



Figura 3.16: Valutazione dello slump nella miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T

La seguente tabella mostra i valori dello slump e del flow valutati per la miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T:

#### Tabella 3.67: Valori dello slump e del flow della miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T

Slump test			
Slump [mm]	60,75		
Slump flow	D1 [mm]	170	
	D2 [mm]	169	

# 3.2 Valutazione delle proprietà meccaniche delle miscele di calcestruzzo schiumato allo stato indurito

#### 3.2.1 Resistenza a flessione

La resistenza a flessione è stata determinata attraverso la prova di flessione su tre punti, mediante l'utilizzo della macchina ZWICK Line – Z010, con una capacità di carico pari a 50 kN. La prova è stata condotta su provini prismatici di dimensioni 40 X 40 X 160 mm, stagionati in acqua per 28 giorni. Sono stati prodotti 3 provini per ogni miscela per un totale di 51 provini (17 miscele).

I provini sono stati scasserati dopo almeno 24 ore dal confezionamento. Dopo lo scassero, ciascun provino è stato pesato e riposto in acqua alla temperatura di 20°C, per i restanti giorni di stagionatura.

Una volta che il materiale aveva sviluppato un'adeguata resistenza, sui provini, prima di essere testati, è stato realizzato un intaglio mediante l'utilizzo di una sega circolare (Figura 3.17), in corrispondenza della sezione di mezzeria. L'intaglio, secondo normativa [27], deve essere realizzato in una delle facce ortogonali a quella di getto.



Figura 3.17: Realizzazione dell'intaglio nei provini mediante sega circolare

Al termine della stagionatura venivano rimossi dall'acqua, misurati (dimensioni provino e intaglio) e venivano inoltre incollate le piastrine metalliche necessarie per l'installazione dell'estensimetro.

I provini prismatici sono stati realizzati rispettando tutti i requisiti geometrici previsti dalla normativa JCI-S-001-2003 [27]:



Figura 3.18: Requisiti geometrici, per la realizzazione dei provini da testare, previsti dalla normativa JCI-S-001-2003 [27]

Secondo la normativa, è necessario che [27]:

- la profondità (D) della sezione trasversale del provino sia maggiore, o al più uguale, a quattro volte la dimensione massima dell'aggregato;
- la larghezza (B) della sezione trasversale del provino sia maggiore, o al più uguale, alla dimensione massima dell'aggregato;

- lo span (S) sia pari a tre volte la profondità della sezione trasversale (D);
- La lunghezza del provino non sia inferiore a tre volte la profondità della sezione trasversale (D);
- la profondità dell'intaglio (a<sub>0</sub>) sia pari al 30% della profondità della sezione trasversale del provino;
- la larghezza dell'intaglio sia inferiore, o al più uguale, a 5 mm.

Di seguito viene mostrata la macchina utilizzata per la prova di flessione su tre punti:



Figura 3.19: Macchina per prova di flessione su tre punti

Le prove sono tutte state condotte a controllo di apertura della fessura (CMOD), con una velocità di applicazione del carico pari a 0,005 mm/min.

La prova di flessione su tre punti permette di calcolare le curve Carico – CMOD.

Di seguito viene riportato un esempio della curva Carico – CMOD ottenuta dal test di flessione su tre punti eseguito sul primo provino della serie denominata MIX2CBD\_DMAX025, in modo da illustrare le varie fasi, più o meno accentuate in base al tipo di miscela analizzata, del comportamento del materiale durante il test:



Figura 3.20: Curva Carico – CMOD del primo provino della miscela MIX2CBD\_DMAX025

Dalla curva si possono distinguere tre fasi principali sul comportamento del materiale durante la prova: nella prima fase si vede che la flessione incrementa linearmente con il carico; successivamente, si ha una fase, prima del raggiungimento del picco, in cui cambia la pendenza della curva ed inizia un processo di fessurazione, in cui si ha la formazione di micro cricche che partono dal notch ed iniziano ad espandersi lentamente; infine, nella terza ed ultima fase, si nota un aumento molto più lento della deformazione (fase post picco), in cui si ha un incremento dell'estensione delle fessure più rapido [28].

La resistenza a flessione è stata valutata mediante l'utilizzo della seguente formula [29]:

$$\sigma_f = \frac{3}{2} \frac{F_{max}l}{bh^2} \tag{10}$$

dove:

- *F<sub>max</sub>* = massimo carico applicato [N]
- *l* = lunghezza di span [mm]
- *b* = profondità del provino [mm]
- *h* = altezza netta del ligament [mm]

#### 3.2.1.1 <u>Analisi dei risultati</u>

Vengono di seguito riportati, nella seguente tabella, i valori della resistenza a flessione ottenuti dalle prove di flessione su tre punti, riportando per ogni provino di ogni singola miscela la densità in aria e la densità secca:

Tabella 3.68: Valori di resistenza a flessione di tutte le miscele di calcestruzzo schiumato realizzate durante la fase sperimentale

			Resistenza a flessione $\sigma_{f}$
	Densità in aria [kg/m³]	Densità secca [kg/m <sup>3</sup> ]	[MPa]
MIX 1_1	1771,56	1680,63	3,94
MIX 1_2	1847,05	1751,72	4,74
MIX 1_3	1723,42	1637,24	3,89
MIX 2_1	1663,26	1589,27	3,22
MIX 2_2	1635,72	1564,22	3,11
MIX 2_3	1738,96	1661,04	3,64
MIX 2BIS_1	1627,42	1560,97	3,29
MIX 2BIS_2	1622,67	1552,94	2,97
MIX 2BIS_3	1590,21	1521,39	3,00
MIX 3_1	1521,04	1454,25	2,66
MIX 3_2	1545,53	1476,40	2,63
MIX 3_3	1573,29	1508,02	3,12
MIX 4_1	1750,28	1674,73	4,01
MIX 4_2	1727,87	1654,01	3,72
MIX 4_3	1867,67	1798,62	4,14
MIX 5_1	1640,98	1573,22	3,26
MIX 5_2	1623,45	1554,75	3,08
MIX 5_3	1645,21	1576,23	3,02
MIX2_ISOCEM_1	1547,96	1446,59	3,33
MIX2_ISOCEM_2	1560,38	1457,21	3,58
MIX2_ISOCEM_3	1565,25	1462,05	3,05
MIX2_CBD_1	1550,56	1449,40	2,97
MIX2_CBD_2	1553,18	1451,73	2,67
MIX2_CBD_3	1537,79	1436,34	2,79
MIX2_CBD_DMAX025_1	1880,32	1746,28	5,12
MIX2_CBD_DMAX025_2	1916,40	1772,01	4,51
MIX2_CBD_DMAX025_3	1901,46	1759,58	4,52
MIX2_CBD_DMAX05_1	1883,02	1762,50	5,22
MIX2_CBD_DMAX05_2	1886,64	1761,85	4,90
MIX2_CBD_DMAX05_3	1857,77	1735,79	5,44
M2CBD025_O+T_1	1597,87	1465,03	3,17
M2CBD025_O+T_2	1610,86	1478,08	3,17
M2CBD025_O+T_3	1632,40	1499,50	3,03
M2CBD025_0_1	1724,81	1580,50	3,74
M2CBD025_0_2	1734,85	1588,21	4,39
M2CBD025_0_3	1732,80	1588,88	4,43
M2CBD025_0_A/C0,5_1	1671,70	1529,07	3,29
M2CBD025_O_A/C0,5_2	1659,81	1519,73	3,48

M2CBD025_O_A/C0,5_3	1659,66	1520,86	3,69
M2CBD05_0_A/C0,45_1	1580,51	1463,09	2,89
M2CBD05_0_A/C0,45_2	1606,25	1496,85	3,17
M2CBD05_0_A/C0,45_3	1573,36	1465,48	2,73
M2CBD05_02_1	1349,77	1244,74	2,02
M2CBD05_02_2	1396,20	1289,50	2,40
M2CBD05_02_3	1364,25	1259,76	2,30
M2CBD025_1,8_O+T_1	1510,87	1409,42	2,51
M2CBD025_1,8_O+T_2	1492,46	1391,01	2,46
M2CBD025_1,8_O+T_3	1503,01	1401,56	3,07
M2BDB025_1,5_O+T_1	1424,67	1317,97	2,23
M2CBD025_1,5_O+T_2	1408,43	1301,73	2,61
M2CBD025_1,5_O+T_3	1385,19	1278,49	2,70

Viene di seguito riportate, in forma tabellare, le densità target relative ad ogni singola miscela:
Series	Samples	γ <sub>d</sub> [kg/m³]	R <sub>c,A</sub> [MPa]	R <sub>c,B</sub> [MPa]	R <sub>c</sub> [MPa]	f <sub>c</sub> [MPa]	G <sub>f</sub> [N/mm]	γ <sub>target</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	R <sub>c,media</sub> [MPa]	f <sub>c,media</sub> [MPa]	G <sub>f,media</sub> [N/mm]
	1	1680,6	35,93	36,11	36,02	3,94	0,039				
	2	1751,7	42,08	41,10	41,59	4,74	0,049				
MIX1	3	1637,2	27,50	28,89	28,19	3,89	0,042	1700 ±	38.8	1 31	0.044
	mean		35	5,27	35,27	4,19	0,043	50	50,0	4,54	0,044
	st.dev		6	,04	6,73	0,48	0,005				
	cov		17	,14%	19,08%	11,41%	11,61%				
	1	1589,3	27,66	26,69	27,17	3,22	0,031				
	2	1564,2	25,14	23,30	24,22	3,11	0,033				
MIVO	3	1661,0	31,11	30,40	30,75	3,64	0,036	1600 ±	20.06	3 13	0,033
IVIIAZ	mean		27	7,38	27,38	3,32	0,033	50 20,50	20,90	5,45	
	st.dev		3,01		3,27	0,28	0,003				
	cov		10,98%		11,94%	8,41%	7,98%				
	1	1561,0	24,36	22,97	23,66	3,29	0,030				
	2	1552,9	21,11	20,28	20,70	2,97	0,027				
MIVODIC	3	1521,4	21,16	20,06	20,61	3,00	0,031	1550 ±	21 66	2 00	0 0 2 0
ΙΫΙΙΛΖΟΙΟ	mean		21	L,66	21,66	3,09	0,029	50	21,00	3,09	0,029
	st.dev		1	,67	1,74	0,18	0,002				
	cov		7,	72%	8,02%	5,68%	6,11%				
	1	1454,2	17,43	18,06	17,75	2,66	0,025				
	2	1476,4	19,29	17,04	18,17	2,63	0,029	1500 1			
MIX3	3	1508,0	18,95	20,74	19,85	3,12	0,026	1300 ±	18,59	2,80	0,027
	mean		18	3,59	18,59	2,80	0,027	50			
	st.dev		1	,36	1,11	0,27	0,002				

Tabella 3.69: Tabella riassuntiva di tutti i valori delle proprietà meccaniche calcolati per ogni singola miscela con le relative densità target

	cov		7,3	33%	5,98%	9,69%	7,69%				
	1	1674,7	21,20	16,94	19,07	4,01	0,045				
	2	1654,0	18,64	18,16	18,40	3,72	0,056				
	3	1798,6	21,18	19,72	20,45	4,14	0,051	1650 ±	10 74	2.96	
101174	mean		19	,31	19,31	3,95	0,051	50	10,74	5,00	0,050
	st.dev		1,	71	1,05	0,22	0,006				
	cov		8,85%		5,41%	5,45%	10,89%				
	1	1573,2	22,66	23,31	22,99	3,26	0,031				
	2	1554,7	20,75	18,70	19,73	3,08	0,034				
MIX5	3	1576,2	21,44	21,06	21,25	3,02	0,031	1550 ±	1550 ± 21,32 50	3,12	0,032
MIND	mean		21	,32	21,32	3,12	0,032	50			
	st.dev		1,	61	1,63	0,13	0,002				
	cov		7,5	57%	7,65%	4,01%	4,76%				
	1	1446,6	18,07	15,59	16,83	3,33	0,041				
	2	1457,2	14,92	17,73	16,32	3,58	0,045			3 45	
MIX2 ISOCEM	3	1462,1	18,58	16,37	17,48	3,05	0,033	1450 ±	16.0		0.043
	mean		16,88		16,88	3,32	0,040	50	10,9	5,75	0,043
	st.dev		1,47		0,58	0,26	0,006				
	cov		8,7	/1%	3,43%	7,95%	15,06%				
	1	1449,4	18,40	19,63	19,01	2,97	0,036				
	2	1451,7	18,91	20,48	19,69	2,67	0,033				
	3	1436,3	17,68	16,34	17,01	2,79	0,031	1450 ±	18 57	2 88	0 033
WIXZ_COD	mean		18	,57	18,57	2,81	0,033	50	10,57	2,00	0,055
	st.dev		1,	46	1,40	0,15	0,003				
	cov		7,88%		7,52%	5,37%	8,33%				
	1	1746,3	46,30	45,02	45,66	5,12	0,056				
	2	1772,0	42,52	47,24	44,88	4,51	0,040	1750 ±	11 15	A 72	0.047
	3	1759,6	44,29	41,33	42,81	4,52	0,045	50	44,4J	4,/2	0,047
	mean		44	,45	44,45	4,72	0,043				

	st.dev	2,24		1,47	0,35	0,004					
	cov		5,0	03%	3,31%	7,40%	8,24%				
	1	1762,5	45,36	47,05	46,21	5,22	0,057				
	2	1761,8	44,24	46,25	45,24	4,90	0,047				
	3	1735 <i>,</i> 8	46,23	38,41	42,32	5,44	0,055	1750 ±		Г 10	0.050
IVIIX2CBD_DIVIAX05	mean		44	,59	44,59	5,19	0,053	50	44,59	5,19	0,053
	st.dev		3,	,18	2,02	0,27	0,006				
	соч		7,2	12%	4,54%	5,21%	10,47%				
	1	1465,0	25,87	21,90	23,88	3,17	0,035				
	2	1478,1	25,01	24,03	24,52	3,17	0,032				
	3	1499,5	26,11	/	26,11	3,03	0,028	1450 ±	21 01	2 1 7	0.024
	mean		24	,58	24,84	3,12	0,032	50	24,04	5,17	0,054
	st.dev		1,71		1,15	0,08	0,004				
	соч		6,9	95%	4,63%	2,51%	11,15%				
	1	1580,5	/	35,93	35,93	3,74	0,045				
	2	1588,2	32,22	27,97	30,09	4,39	0,062				
	3	1588,9	30,92	31,89	31,40	4,43	0,060	1550 ±	22 10	4 10	0.056
	mean		31	.,79	32,48	4,19	0,056	50	52,40	4,19	0,050
	st.dev		2,	,86	3,06	0,39	0,009				
	cov		9,0	00%	9,43%	9,25%	16,28%				
	1	1529,1	22,23	/	22,23	3,29	0,031				
	2	1519,7	/	22,40	22,40	3,48	0,030				
	3	1520,9	21,62	19,18	20,40	3,69	0,030	1500 ±	21 7	2 20	0.030
	mean		21	.,36	21,68	3,49	0,030	50	21,7	3,39	0,030
	st.dev		1,	,49	1,11	0,20	0,001				
	cov		6,9	97%	5,11%	5,76%	1,72%				
	1	1463,1	14,24	15,31	14,78	2,89	0,028	1/50 +			
M2CBD05_O_AC0,45	2	1496,8	15,15	/	15,15	3,17	0,037	1430 ± 50	14,97	2,81	0,030
	3	1465,5	15,00	/	15,00	2,73	0,032				

	mean		14,92		14,97	2,93	0,032				
	st.dev		0,47		0,19	0,22	0,005				
	cov		3,2	17%	1,25%	7,66%	14,52%				
	1	1244,7	13,58	11,10	12,34	2,02	0,022				
	2	1289,5	14,44	12,24	13,34	2,40	0,025		12 (1	2.24	
	3	1259,8	13,28	11,01	12,14	2,30	0,027	1250 ±			0.025
	mean		12,61		12,61	2,24	0,025	50	12,01	2,24	0,025
	st.dev		1,39 0,64 0,19 0,002								
	cov		11,	05%	5,09%	8,68%	9,34%				
	1	1409,4	16,16	21,06	18,61	2,51	0,043				
	2	1391,0	17,54	22,23	19,88	2,46	0,036	1400 ± 10.05	2 69		
	3	1401,6	17,67	19,62	18,64	3,07	0,044			0.041	
	mean		19,05		19,05	2,68	0,041	50 19,05	19,05	2,00	0,041
	st.dev		2,32		0,73	0,34	0,004				
	cov		12,	21%	3,82%	12,74%	9,93%				
	1	1318,0	18,98	21,34	20,16	2,23	0,034				
	2	1301,7	20,34	20,16	20,25	2,61	0,033				
	3	1278,5	19,07	20,38	19,73	2,70	0,043	1300 ±	20.20	2 42	0.024
MI2CBD025_1,5_011+1	mean		20	),05	20,05	2,51	0,037	50 2	20,20	2,42	0,034
	st.dev		0,	,89	0,28	0,25	0,005				
	cov		4,4	45%	1,39%	10,09%	14,27%				

I risultati della resistenza a flessione sono stati rappresentati in un grafico a dispersione in modo da poterne studiare l'andamento in funzione ai valori di densità in aria e densità secca:



Figura 3.21: Valori di resistenza a flessione al variare della densità in aria



Figura 3.22: Valori di resistenza a flessione al variare della densità secca

Un primo risultato, già evidente dallo studio delle proprietà allo stato fresco, ma che viene messo in luce molto bene nella rappresentazione grafica è la significativa influenza delle scelte di mix design sulla densità finale della miscela di calcestruzzo schiumato. Non bisogna dimenticare, infatti, che, in generale, le miscele presentate in questo lavoro di tesi sono state realizzate con lo stesso rapporto schiuma/cemento o, in altre parole, utilizzando la stessa quantità di schiuma. Dunque, modificando il mix design del materiale (ad esempio quantità di acqua, di tensioattivo, di viscosizzante, di superfluidificante, ecc), con la stessa quantità di schiuma è possibile ottenere miscele

cementizie caratterizzate da densità molto diverse tra loro, da circa 1250 kg/m<sup>3</sup> a circa 1800 kg/m<sup>3</sup> nel caso oggetto di studio. Questo fa capire come il progetto della miscela del calcestruzzo schiumato sia molto più complesso del mix design di un calcestruzzo di densità ordinaria e piccoli errori nella progettazione della miscela possono compromettere in modo significativo le prestazioni del materiale.

Dai grafici di dispersione, nelle Figure Figura 3.21 e Figura 3.22, si nota l'incremento della resistenza a flessione all'aumentare della densità, in modo però meno accentuato rispetto a quanto riscontrato nel caso della resistenza a compressione, come verrà mostrato in seguito. Per valori di densità secca fino a circa 1650 kg/m<sup>3</sup>, le miscele di calcestruzzo schiumato non hanno mostrato variazioni sostanziali dei valori di resistenza a flessione, eccetto la miscela ottimizzata M2CBD025\_O che si discosta dall'andamento delle altre miscele, presentando valori di resistenza a flessione superiori a parità di densità secca. Per valori di densità secca superiori a circa 1650 kg/m<sup>3</sup>, i valori di resistenza a flessione subiscono una variazione molto più pronunciata al variare della densità secca rispetto alle miscele con densità inferiore, mostrando un incremento della resistenza a flessione all'aumentare della densità.

Nel seguente istogramma in Figura 3.23, vengono mostrati i valori di resistenza a flessione media di ogni miscela analizzata, con le relative error bar, al variare densità target; questo tipo di rappresentazione permette di mettere meglio in evidenza gli effetti delle modifiche effettuate sulle capacità flessionali del calcestruzzi schiumati presentati in questo lavoro di tesi, mentre la rappresentazione a dispersione permette di mettere bene in luce il trend al variare della densità. A tal proposito, risulta che il trend è pressocché lineare al variare della densità, evidenza che mette in luce come, tra tutti i parametri investigati, quello che ha più peso nei confronti delle capacità flessionali del materiale sia proprio la densità.



Figura 3.23: Valori di resistenza a flessione media al variare della densità target

La miscela MIX2CBD\_DMAX05 è quella caratterizzata dal maggior valore di resistenza a flessione (4,72 MPa), ma anche dalla densità più elevata, mentre la miscela M2CBD05\_O2 è quella che presenta il minor valore di resistenza a flessione (2,24 MPa), ma anche dalla densità più bassa. In generale si nota che, l'utilizzo di sabbia caratterizzata da un diametro massimo più grande porta ad un leggero aumento della resistenza a flessione; e questo viene messo in luce dalle miscele MIX2CBD\_DMAX05 e MIX2CBD\_DMAX025, in cui a parità di densità target (1750 ± 50 kg/m<sup>3</sup>), la miscela MIX2CBD\_DMAX05, in cui è stata utilizzata una sabbia fine (d<sub>max</sub> = 0,5 mm) ha mostrato un valore di resistenza a flessione (5,19 MPa) nettamente superiore rispetto quello raggiunto dalla miscela MIX2CBD\_DMAX025 (4,72 MPa), in cui è stata utilizzata una sabbia con un diametro massimo delle particelle inferiore (d<sub>max</sub> = 0,25 mm). L'incremento del diametro massimo della sabbia ha dunque portato ad un incremento delle capacità flessionali pari a circa il 10% a parità di densità. Questo risultato è da attribuirsi ad un maggior effetto di ingranamento esercitato dalla presenza di particelle di diametro maggiore.

Dai valori di resistenza a flessione riportati nella Figura 3.23, viene anche osservato l'effetto apportato dalla differente tipologia di tensioattivo utilizzato per creare la schiuma: concentrando l'attenzione sulla densità target 1450 ± 50 kg/m<sup>3</sup>, è possibile notare che la miscela MIX2\_CBD, in cui è stato utilizzato il tensioattivo Cbd, è caratterizzata da un valore di resistenza a flessione (2,88 MPa) nettamente inferiore

rispetto quello ottenuto dalla miscela MIX2\_ISOCEM (3,45 MPa), miscela in cui è stato utilizzato il tensioattivo Isocem; quindi, il tensioattivo Isocem è risultato migliore anche del tensioattivo Foamin, in quanto, la miscela MIX2\_ISOCEM ha presentato un valore di resistenza a flessione (3,45 MPa) leggermente superiore a quello ottenuto con la miscela MIX2 (3,43 MPa), pur avendo una densità target inferiore. Prendendo in considerazione la densità secca target pari a 1450 kg/m<sup>3</sup>, la miscela MIX2ISOCEM è stata quella che ha raggiunto il maggior valore di resistenza a flessione.

Interessanti commenti possono desumersi dal confronto tra i risultati delle miscele di densità secca target circa pari a 1450 kg/m<sup>3</sup>. Dal confronto tra MIX2 ISOCEM (1450 kg/m<sup>3</sup>) e MIX3 (1500 kg/m<sup>3</sup>), la cui differenza sta solo nella quantità di viscosizzante utilizzata, maggiore nel primo caso (in cui si è impiegato un rapporto viscosizzantecemento pari a 0,05, maggiore rispetto allo 0,02 impiegato nel MIX3), si evince come una quantità maggiore di viscosizzante dia luogo a migliori prestazioni in termini di capacità flessionali (incremento pari a 23.28%), nonostante la minor densità della miscela. Questo potrebbe essere dovuto alla migliore microstruttura associata ad un maggiore impiego di viscosizzante nella produzione del calcestruzzo schiumato. Infatti, la presenza del viscosizzante dà luogo ad un sistema cementizio caratterizzato da una maggiore consistenza che si traduce in una maggiore forza di confinamento sulle superfici delle bolle d'aria presenti all'interno del sistema cementizio. Grazie alla forza di confinamento più elevata, le bolle d'aria raggiungono una condizione di equilibrio nel caso di diametri più piccoli. La pressione all'interno delle bolle, infatti, cresce al decrescere del diametro delle bolle stesse. Dunque, a forze di confinamento maggiori corrispondono configurazioni di equilibrio con bolle di diametro minore. È noto che, a bolle di diametro minore e ben distribuite omogeneamente nella matrice cementizia corrispondono prestazioni meccaniche migliori. Questo stesso ragionamento è confermato anche dal confronto tra le miscele MIX2 e MIX2 BIS, realizzate stavolta con il tensioattivo Foamin. Le differenze in termini di densità tra le due miscele sono molto contenute, 1600 kg/m<sup>3</sup> la prima, 1550 kg/m<sup>3</sup> la seconda. Nonostante il diverso tensioattivo impiegato, anche in questo caso viene confermato che una maggiore quantità di viscosizzante (rapporto viscosizzante-cemento pari a 0,05 per il MIX2 e pari a 0,02 per il MIX2 BIS) dà luogo a prestazioni migliori in termini di capacità flessionali.

L'influenza della tipologia di tensioattivo si può dedurre confrontando le miscele MIX2ISOCEM e MIX2CBD, entrambe caratterizzate da una densità secca target pari a 1450 kg/m<sup>3</sup>. Si nota come le prestazioni associate al tensioattivo ISOCEM, in termini di capacità flessionali, siano migliori rispetto a quelle relative al tensioattivo CBD. Questo risultato potrebbe essere associato alla differente microstruttura del calcestruzzo schiumato prodotto con ISOCEM e sono necessarie indagini più dettagliate sulla morfologia e distribuzione delle bolle.

Il confronto tra le miscele MIX2\_CBD e MIX2\_CBD025\_OTT+T mette in luce che l'ottimizzazione del mix design della miscela può portare ad ottenere capacità flessionali migliori anche nel caso di impiego di diametro massimo degli aggregati più

basso. Questo risultato fa capire il ruolo fondamentale della microstruttura nel campo dei calcestruzzi schiumati, che riesce a superare l'effetto benefico dell'ingranamento degli aggregati sulle capacità flessionali del materiale a pari densità. Questo stesso confronto, inoltre, mette in luce come, a maggiori rapporti acqua/cemento, non necessariamente corrispondano peggiori capacità flessionali.

Un altro evidente risultato è associato alla variazione del rapporto aggregato/cemento. Infatti, al decrescere di questo rapporto, si nota una sostanziale riduzione delle capacità flessionali del calcestruzzo schiumato. Questo non è solo associato alla minor densità delle miscele prodotte con un minor rapporto sabbia/cemento, ma anche e soprattutto dal minor effetto di ingranamento che si ha nel caso di campioni caratterizzati da minor quantità di sabbia nell'unità di volume, come testimoniato dal confronto tra le miscele MIX2CBD025\_1,8OTT+T (rapporto sabbia/cemento pari a 1,8) e MIX2CBD025\_OTT+T (rapporto sabbia/cemento pari a 2,3) di densità paragonabile e la cui unica differenza sta nel rapporto sabbia/cemento impiegato. In questo caso, la riduzione del quantitativo di sabbia nella miscela ha prodotto una riduzione della resistenza a flessione pari al 15.48%.

Il risultato più interessante è certamente quello associato alla miscela MIX2CBD025\_OTT, caratterizzata da una densità secca target pari a 1550 kg/m<sup>3</sup> e da capacità flessionali (4,19 MPa) ben superiori rispetto a tutte le altre miscele caratterizzate da una densità circa simile e paragonabile a quella di miscele ben più dense, anche dell'ordine dei 1700 kg/m<sup>3</sup>.

Nella miscela M2COB025\_OTT+T, l'aggiunta di tensioattivo libero, ha portato ad ottenere una riduzione della resistenza a flessione pari al 23,35% rispetto la precedente miscela (M2COB025\_OTT). Uno dei motivi di tale riduzione è sicuramente dovuto alla maggiore quantità di schiuma prodotta durante la miscelazione per via della presenza di tensioattivo libero, causando pertanto una riduzione della densità, pari in questo secondo caso a circa 1450 kg/m<sup>3</sup>.

Nella miscela M2COB025\_O\_AC0,5 è stato ulteriormente incrementato il contenuto d'acqua rispetto alla miscela M2COB025\_OTT; questo ha portato ad un importante riduzione della resistenza a flessione, pari al -19,17%, con una leggera riduzione della densità secca target. Passando alle miscele ottimizzate, in cui è stata utilizzata una sabbia con diametro massimo delle particelle pari a 0,5 mm, si nota che la miscela M2COB05\_O\_AC0,45 è stata quella ad aver raggiunto il più basso valore di resistenza a flessione tra tutte le miscele con la stessa densità secca target (1450 kg/m<sup>3</sup>).

## 3.2.2 Resistenza a compressione

Dopo il test di flessione a tre punti, ciascuna metà del provino rotto, è stata sottoposta ad una prova di compressione come riportato in Figura 3.24:



Figura 3.24: Macchina utilizzata per i test di compressione

Tutte le prove di compressione sono state eseguite a controllo di deformazione, con una velocità di applicazione del carico pari a 2400 N/s, tranne per la miscela M2COB05\_O2 e per quelle successive, in cui la velocità di carico è stata ridotta a 2000 N/s, in quanto la precedente velocità risultava troppo eccessiva per la tipologia di materiale da testare, portando ad errori di registrazione dei valori ottenuti da parte del sistema di acquisizione dati.

## 3.2.2.1 Analisi dei risultati

Vengono di seguito riportati, nella seguente Tabella 3.70 i valori della resistenza a compressione ottenuti dalle prove di compressione, riportando per ogni provino di ogni singola miscela la densità in aria e la densità secca:

			Resistenza a
	Densità in aria [kg/m <sup>3</sup> ]	Densità secca [kg/m³]	compressione $\sigma_{c}$ [MPa]
MIX 1_1	1771,56	1680,63	36,02
MIX 1_2	1847,05	1751,72	41,59
MIX 1_3	1723,42	1637,24	28,19
MIX 2_1	1663,26	1589,27	27,17
MIX 2_2	1635,72	1564,22	24,22
MIX 2_3	1738,96	1661,04	30,75
MIX 2BIS_1	1627,42	1560,97	23,66
MIX 2BIS_2	1622,67	1552,94	20,70
MIX 2BIS_3	1590,21	1521,39	20,61
MIX 3_1	1521,04	1454,25	17,75
MIX 3_2	1545,53	1476,40	18,17
MIX 3_3	1573,29	1508,02	19,85
MIX 4_1	1750,28	1674,73	19,07
MIX 4_2	1727,87	1654,01	18,40
MIX 4_3	1867,67	1798,62	20,45
MIX 5_1	1640,98	1573,22	22,99
MIX 5_2	1623,45	1554,75	19,73
MIX 5 3	1645,21	1576,23	21,25
MIX2_ISOCEM_1	1547,96	1446,59	16,83
MIX2 ISOCEM 2	1560,38	1457,21	16,32
MIX2 ISOCEM 3	1565,25	1462,05	17,48
MIX2 CBD 1	1550,56	1449,40	19,01
MIX2 CBD 2	1553,18	1451,73	19,69
MIX2 CBD 3	1537,79	1436,34	17,01
MIX2 CBD DMAX025 1	1880,32	1746,28	45,66
MIX2_CBD_DMAX025_2	1916,40	1772,01	44,88
MIX2 CBD DMAX025 3	1901,46	1759,58	42,81
MIX2 CBD DMAX05 1	1883,02	1762,50	46,21
MIX2 CBD DMAX05 2	1886,64	1761,85	45,24
MIX2 CBD DMAX05 3	1857,77	1735,79	42,32
M2CBD025 O+T 1	1597,87	1465,03	23,88
M2CBD025_0+T_2	1610,86	1478,08	24,52
M2CBD025_0+T_3	1632,40	1499,50	26,11
M2CBD025 0 1	1724,81	1580,50	35,93
M2CBD025 0 2	1734,85	1588,21	30,09
M2CBD025 0 3	1732,80	1588,88	31,40
M2CBD025 O A/C0,5 1	1671,70	1529,07	22,23
M2CBD025 O A/C0,5 2	1659,81	1519,73	22,40
M2CBD025 O A/C0.5 3	1659.66	1520.86	20,40
M2CBD05 O A/C0.45 1	1580.51	1463.09	14,78
M2CBD05 O A/C0.45 2	1606.25	1496.85	15.15
M2CBD05 O A/C0,45	1573.36	1465,48	15.00
M2CBD05 02 1	1349.77	1244.74	12.34
M2CBD05 02 2	1396.20	1289.50	13.34
	-, -	- /	/ -

Tabella 3.70: Valori di resistenza a compressione di tutte le miscele di calcestruzzo schiumato realizzate durante la fase sperimentale

M2CBD05_02_3	1364,25	1259,76	12,14
M2CBD025_1,8_O+T_1	1510,87	1409,42	18,61
M2CBD025_1,8_O+T_2	1492,46	1391,01	19,88
M2CBD025_1,8_O+T_3	1503,01	1401,56	18,64
M2CBD025_1,5_O+T_1	1424,67	1317,97	20,16
M2CBD025_1,5_O+T_2	1408,43	1301,73	20,25
M2CBD025_1,5_O+T_3	1385,19	1278,49	19,73

I risultati della resistenza a compressione sono stati rappresentati in un grafico a dispersione in modo da poterne studiare l'andamento in funzione ai valori di densità in aria e densità secca:



Figura 3.25: Valori di resistenza a compressione al variare della densità in aria



Figura 3.26: Valori di resistenza a compressione al variare della densità secca

Dai grafici sopra riportati, risalta l'incremento della resistenza a compressione all'aumentare della densità; in particolare, la resistenza a compressione tende ad aumentare in modo quasi lineare con la densità. Nella Figura 3.26, si nota come tale

variazione lineare della resistenza a compressione al variare della densità, sia caratterizzata da due differenti pendenze: per valori di densità secca inferiori a 1600 kg/m<sup>3</sup>, si nota che i valori della resistenza a compressione subiscono una variazione, al variare della densità, inferiore rispetto ai valori di resistenza a compressione relativi ai provini con densità superiori a 1600 kg/m<sup>3</sup>. Dal grafico in Figura 3.26, si nota anche la presenza di miscele, i cui valori di resistenza si distaccano dall'andamento globale di tutte le altre miscele presentando, a parità di densità, valori di resistenza superiori o inferiori. Ad esempio, i provini della miscela MIX4 sono caratterizzati da valori di densità secca piuttosto elevati (tra 1650 kg/m<sup>3</sup> e 1800/ kg/m<sup>3</sup>) e, nonostante ciò, presentano bassi valori di resistenza a compressione, paragonabili a quelli ottenuti per le densità più basse e molto inferiori rispetto alle altre miscele caratterizzate da densità simili.

In particolare, la miscela denominata MIX4 è stata realizzata utilizzando una sabbia caratterizzata da diametro massimo pari a 4 mm. Come già detto, questa miscela era caratterizzata da una significativa instabilità delle bolle durante lo stato fresco. I fenomeni di coalescenza e di collasso delle bolle d'aria di questa miscela hanno dato luogo a significativi incrementi di densità e ad una microstruttura caratterizzata da bolle meno omogeneamente disperse all'interno della matrice cementizia e a celle parzialmente aperte, laddove si venivano a verificare fenomeni di coalescenza. Questo ha inficiato significativamente le resistenze a compressione del materiale.

Al contrario, i valori di resistenza delle miscele ottimizzate M2CBD025\_O+T e M2CBD025\_O, i cui valori di densità secca sono rispettivamente pari a 1450 kg/m<sup>3</sup> e 1550 kg/m<sup>3</sup>, sono nettamente superiori rispetto i valori di resistenza delle altre miscele, a parità di densità secca.

Nel seguente istogramma, riportato nella Figura 3.27, vengono mostrati i valori di resistenza a compressione media di ogni miscela analizzata, con le relative error bar, al variare densità target:



Figura 3.27: Valori di resistenza a compressione media al variare della densità target

La prima miscela realizzata (MIX1), ha mostrato un valore di resistenza a compressione piuttosto elevato, leggermente inferiore a 40 MPa, con una densità target di 1700 ± 50 kg/m<sup>3</sup>. La successiva miscela realizzata è stata la miscela MIX2, in cui è stato ridotto leggermente il rapporto a/c ad un valore pari a 0,325 (valore di partenza di a/c = 0,345) ed è stato aumentato il contenuto di superfluidificante dall'1,5% al 2% rispetto al peso del cemento. Come si evince dalla Figura 3.27, questo ha portato ad una riduzione della densità, passando da una densità target di 1700 ± 50 kg/m<sup>3</sup> ad una densità target pari a 1600 ± 50 kg/m<sup>3</sup> e di conseguenza ad una riduzione della resistenza a compressione media da 38,8 MPa (MIX1) a 28,8 MPa (MIX2). Tuttavia, questa importante riduzione di resistenza a compressione non può essere spiegata solo con la riduzione di densità di 100 kg/m<sup>3</sup> circa. Infatti, nei calcestruzzi schiumati non è certo che al decrescere del rapporto acqua/cemento si abbia un incremento della resistenza a compressione, come accade nei calcestruzzi ordinari. Entrano infatti in gioco diversi fattori quali il rapporto aria/cemento e la presenza di particelle di cemento flocculate, con evidenti grumi, per via dell'azione chimico-fisica delle molecole di tensioattivo, ben diversa al variare del rapporto acqua/cemento.

Come già anticipato, la schiuma introdotta nelle varie miscele, non è stata realizzata con lo stesso tensioattivo. Nelle prime tre miscele (MIX1, MIX2 e MIX2BIS) è stato utilizzato il tensioattivo Foamin, si è poi passati ad utilizzare dalla miscela MIX3 il tensioattivo Isocem, ed infine, nelle ultime miscele è stato utilizzato il tensioattivo Cbd.

Attraverso la realizzazione della miscela MIX3, è stato studiato l'effetto della differente tipologia di tensioattivo, necessario per produrre la schiuma, nella miscela, realizzando quindi una miscela che avesse lo stesso mix design della miscela MIX2BIS e sostituendo il tensioattivo Foamin con il tensioattivo Isoltech. L'utilizzo del tensioattivo Isoltech al posto del Foamin ha portato ad una riduzione della densità secca da 1550 ± 50 kg/m<sup>3</sup> a 1500 ± 50 kg/m<sup>3</sup>; questo significa che il tensioattivo Isocem ha permesso di ottenere un sistema migliore nell'accogliere la schiuma e quindi caratterizzato da una maggiore stabilità mentre, in termini di resistenza a compressione, non ha portato ad alcun beneficio, mostrando invece un valore di resistenza inferiore rispetto quello della miscela MIX2BIS, per via della inferiore densità raggiunta.

Nelle successive due miscele, MIX4 e MIX5, è stato invece studiato l'effetto della sostituzione totale e parziale della sabbia fine (d<sub>max</sub> = 2 mm) con sabbia più grossolana (sabbia granita) caratterizzata da un diametro massimo delle particelle pari a 4 mm; precisamente, nella miscela MIX4, la sabbia fine è stata completamente sostituita dalla sabbia granita mentre, nella miscela MIX5, è stata sostituita solo in parte, utilizzando il 70 % di sabbia fine e il 30 % di sabbia granita. Dal grafico in Figura 3.27, si nota che la completa sostituzione della sabbia fine con quella granita ha portato ad un aumento della densità target, da 1500  $\pm$  50 kg/m<sup>3</sup> (MIX3) a 1650  $\pm$  50 kg/m<sup>3</sup> (MIX4), e ad un leggero incremento della resistenza a compressione, da 18,59 Mpa (MIX3) a 18,74 Mpa (MIX4); quindi si può concludere che, la sostituzione della sabbia ( $d_{max} = 2 \text{ mm}$ ) con la sabbia granita, non porta ad alcun miglioramento in termini di resistenza meccanica, in quanto, pur causando un notevole aumento della densità secca non comporta alcun incremento della resistenza a compressione. Invece, nella miscela MIX5, in cui la sabbia fine è stata sostituita solo parzialmente con la sabbia granita, la miscela ha presentato un incremento della resistenza rispetto alla miscela MIX4, raggiungendo un valore di resistenza più elevato rispetto quello raggiunto dalla miscela MIX3 e leggermente inferiore a quello raggiunto dalla miscela MIX2BIS. Bisogna inoltre precisare che, il valore di resistenza a compressione raggiunto dalla miscela MIX5 è risultato maggiore rispetto quello della miscela MIX3 per via della maggiore densità secca.

Il passo successivo è stato quello di valutare la terza, ed ultima, tipologia di tensioattivo confrontandolo con il tensioattivo Isocem, risultato migliore, in termini di stabilità, rispetto al tensioattivo Foamin. Partendo quindi dal mix design della miscela MIX2, sono state realizzate due ulteriori miscele, MIX2\_ISOCEM e MIX2\_CBD, andando a modificare, rispetto al MIX2, solamente la tipologia di tensioattivo utilizzata per creare la schiuma. Dalla Figura 3.27, si nota che sia il tensioattivo Isocem, sia il tensioattivo Cbd, hanno portato ad ottenere valori di densità secca inferiori; inoltre, la miscela con il tensioattivo Cbd, a parità di densità secca, ha mostrato una resistenza a compressione leggermente superiore rispetto quella raggiunta dalla miscela con l'altro tensioattivo (Isocem). Quindi, i valori inferiori della densità secca ottenuti con i tensioattivi Isocem e Cbd, hanno dimostrato che il loro utilizzo permetteva di ottenere un sistema più stabile rispetto quello ottenuto con il tensioattivo Foamin, inoltre, a parità di densità,

la miscela con il tensioattivo Cbd ha mostrato una maggiore resistenza a compressione, sebbene di poco (incremento pari a 10.03%), motivo per il quale il tensioattivo Cbd è stato preferito alle altre due tipologie di tensioattivo ed è stato utilizzato nella realizzazione delle restanti miscele. In ogni caso, sembrerebbe che i tensioattivi Isocem e CBD diano luogo a microstrutture del sistema cementizio alleggerito con schiuma molto simili tra loro, con differenze trascurabili in termini di resistenza a compressione.

La miscela MIX2 è stata poi ottimizzata, utilizzando una sabbia con una dimensione massima delle particelle inferiore: sono state ottenute, mediante setacciatura, una sabbia con dimensione massima delle particelle pari a 0,25 mm e un'altra con dimensione massima delle particelle pari a 0,5 mm, realizzando quindi due ulteriori miscele (MIX2CBD\_DAMX025 e MIX2CBD\_DMAX05). L'utilizzo di sabbia più fine ha portato ad un aumento sostanziale della densità secca (1750 ± 50 kg/m<sup>3</sup>) e della resistenza a compressione (circa 45 MPa), ottenendo, in assoluto, i maggiori valori di resistenza a compressione tra tutte le miscele prodotte.

Queste ultime due miscele sono poi state ottimizzate, aumentando la fase fluida (M2CBD025 O) ed aggiungendo anche del tensioattivo libero nella miscela (M2CBD025 O+T). Prendendo in considerazione la densità target di 1450 ± 50 kg/m<sup>3</sup>, è possibile notare dalla Figura 3.27, che la miscela M2CDB025\_OTT+T è stata quella con il maggiore valore di resistenza a compressione (25,84 MPa). La miscela M2CBD025 O, ha raggiunto un valore di resistenza a compressione davvero interessante, superando i 30 MPa (32,48 MPa) con una densità secca target pari a 1550 kg/m<sup>3</sup> e distaccandosi dai valori di resistenza a compressione raggiunti dalle altre miscele a pari densità. L'aggiunta di tensioattivo libero nella miscela M2CBD025 O+T, ha permesso di ottenere una miscela con una migliore stabilità ma, allo stesso tempo, è stata ottenuta una densità inferiore, per via della maggiore quantità di schiuma prodotta durante la miscelazione a causa della presenza del tensioattivo libero, e quindi, una riduzione della resistenza a compressione. Nella miscela M2CBD025 O AC05 è stata ulteriormente incrementata la quantità di acqua introdotta rispetto la miscela M2CBD025 OTT e questo ha portato ad una riduzione del 33,26% della resistenza a compressione con una riduzione della densità pari a 50 kg/m<sup>3</sup>. Passando alle miscele ottimizzate, in cui è stata utilizzata una sabbia con diametro massimo delle particelle pari a 0,5 mm, si notano prestazioni peggiori in termini di resistenza a compressione e questo viene messo in evidenza dalla miscela M2CBD05 O AC0,45 in cui, a parità di densità secca target (1450 kg/m<sup>3</sup>), ha mostrato il più basso valore di resistenza a compressione rispetto quelli raggiunti dalle altre miscele. Sono stati interessanti invece i valori di resistenza a compressione raggiunti andando a ridurre il rapporto sabbia/cemento. Sono state realizzate, precisamente, due differenti miscele in cui sono stati utilizzati i seguenti rapporti di sabbia/cemento: 1,8 e 1,5. Entrambe le miscele hanno raggiunto circa 20 MPa di resistenza a compressione, valore davvero interessante in relazione ai valori piuttosto bassi di densità secca target (1300 kg/m<sup>3</sup> e 1400 kg/m<sup>3</sup>). Tra le due, quella con il rapporto sabbia/cemento pari a 1,5 è stata quella che ha raggiunto la resistenza a

compressione più elevata, pari a 20,20 MPa, leggermente più elevata rispetto quella raggiunta dall'altra (19,05 MPa), pur avendo una densità secca target leggermente inferiore.

#### 3.2.3 Energia di frattura

L'energia di frattura è stata calcolata a partire dai risultati ottenuti dai test di flessione eseguiti su ogni singolo provino di ciascuna miscela. Per il calcolo, è stata utilizzata la seguente formula, come previsto dalla normativa JCI-S-001-2003 [27]:

$$G_f = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}}$$
(11)

$$W_1 = 0.75 \left(\frac{S}{L}m_1 + 2m_2\right) gCMOD_c \tag{12}$$

dove:

- $G_f$  = Energia di frattura [N/mm<sup>2</sup>]
- $W_0$  = area al di sotto della curva CMOD fino alla rottura del campione [Nmm]
- $W_1$  = lavoro svolto dal peso del provino e dalla macchina di carico [Nmm]
- $A_{lig}$  = area nominale del ligament [mm<sup>2</sup>]
- $m_1$  = massa del provino [kg]
- S = span del carico [mm]
- L = lunghezza totale del campione [mm]
- $m_2$  = massa dell'attrezzatura non attaccata alla macchina di prova ma posizionata sul provino fino alla rottura [mm]
- *g* = accelerazione di gravità [9,807 m/s<sup>2</sup>]
- *CMOD<sub>c</sub>* = apertura della bocca della fessura al momento della rottura [mm]

#### 3.2.3.1 Analisi dei risultati

Vengono di seguito riportati, nella seguente tabella, i valori dell'energia di frattura, riportando per ogni provino di ogni singola miscela la densità in aria e la densità secca:

	Densità in aria [kg/m³]	Densità secca [kg/m³]	Gf [N/mm]
MIX 1_1	1771,56	1680,63	0,039
MIX 1_2	1847,05	1751,72	0,049
MIX 1_3	1723,42	1637,24	0,042
MIX 2_1	1663,26	1589,27	0,031
MIX 2_2	1635,72	1564,22	0,033
MIX 2_3	1738,96	1661,04	0,036
MIX 2BIS_1	1627,42	1560,97	0,030
MIX 2BIS_2	1622,67	1552,94	0,027
MIX 2BIS_3	1590,21	1521,39	0,031
MIX 3_1	1521,04	1454,25	0,025
MIX 3_2	1545,53	1476,40	0,029
MIX 3_3	1573,29	1508,02	0,026
MIX 4_1	1750,28	1674,73	0,045
MIX 4_2	1727,87	1654,01	0,056
MIX 4_3	1867,67	1798,62	0,051
MIX 5_1	1640,98	1573,22	0,031
MIX 5_2	1623,45	1554,75	0,034
MIX 5_3	1645,21	1576,23	0,031
MIX2_ISOCEM_1	1547,96	1446,59	0,041
MIX2_ISOCEM_2	1560,38	1457,21	0,045
MIX2_ISOCEM_3	1565,25	1462,05	0,033
MIX2_CBD_1	1550,56	1449,40	0,036
MIX2_CBD_2	1553,18	1451,73	0,033
MIX2_CBD_3	1537,79	1436,34	0,031
MIX2_CBD_DMAX025_1	1880,32	1746,28	0,056
MIX2_CBD_DMAX025_2	1916,40	1772,01	0,040
MIX2_CBD_DMAX025_3	1901,46	1759,58	0,045
MIX2_CBD_DMAX05_1	1883,02	1762,50	0,057
MIX2_CBD_DMAX05_2	1886,64	1761,85	0,047
MIX2_CBD_DMAX05_3	1857,77	1735,79	0,055
M2CBD025_O+T_1	1597,87	1465,03	0,035
M2CBD025_O+T_2	1610,86	1478,08	0,032
M2CBD025_O+T_3	1632,40	1499,50	0,028
M2CBD025_0_1	1724,81	1580,50	0,045
M2CBD025_0_2	1734,85	1588,21	0,062
M2CBD025_0_3	1732,80	1588,88	0,060
M2CBD025_0_A/C0,5_1	1671,70	1529,07	0,031
M2CBD025_0_A/C0,5_2	1659,81	1519,73	0,030
M2CBD025_O_A/C0,5_3	1659,66	1520,86	0,030
M2CBD05_0_A/C0,45_1	1580,51	1463,09	0,028
M2CBD05_0_A/C0,45_2	1606,25	1496,85	0,037
M2CBD05_0_A/C0,45_3	1573,36	1465,48	0,032

Tabella 3.71: Valori dell'energia di frattura di tutte le miscele di calcestruzzo schiumato realizzate durante la fase sperimentale

M2CBD05_02_1	1349,77	1244,74	0,022
M2CBD05_02_2	1396,20	1289,50	0,025
M2CBD05_02_3	1364,25	1259,76	0,027
M2CBD025_1,8_O+T_1	1510,87	1409,42	0,043
M2CBD025_1,8_O+T_2	1492,46	1391,01	0,036
M2CBD025_1,8_O+T_3	1503,01	1401,56	0,044
M2CBD025_1,5_O+T_1	1424,67	1317,97	0,034
M2CBD025_1,5_O+T_2	1408,43	1301,73	0,033
M2CBD025_1,5_0+T_3	1385,19	1278,49	0,043

I risultati dell'energia di frattura sono stati rappresentati in un grafico a dispersione in modo da poterne studiare l'andamento in funzione dei valori di densità in aria e densità secca:



Figura 3.28: Valori dell'energia di frattura al variare della densità in aria



Figura 3.29: Valori dell'energia di frattura al variare della densità secca

Dalla Figura 3.29 si nota che l'energia di frattura, per valori di densità secca compresi tra 1250 kg/m<sup>3</sup> e 1650 kg/m<sup>3</sup>, non abbia subito alcun incremento all'aumentare della densità secca, tranne nel caso delle miscele ottimizzate con densità secca pari a 1550 kg/m<sup>3</sup>, i cui valori dell'energia di frattura si distaccano dall'andamento medio delle altre miscele a pari densità. Per valori di densità secca superiori a 1650 kg/m<sup>3</sup>, si nota invece un leggero incremento dell'energia di frattura con la densità.

Nel seguente istogramma, vengono mostrati i valori dell'energia di frattura media di ogni miscela analizzata, con le relative error bar, al variare densità target:



Figura 3.30: Valori dell'energia di frattura media al variare della densità target

Come riscontrato per la resistenza a flessione, anche in questo caso viene messo in luce dal grafico l'effetto positivo apportato dall'utilizzo di una sabbia più grossolana nei confronti dell'energia di frattura. La miscela MIX5, in cui parte della sabbia fine è stata sostituita con la sabbia granita più grossolana, ha raggiunto un valore dell'energia di frattura (0,032 N/mm) leggermente superiore rispetto quello raggiunto dalla miscela MIX2\_BIS (0,029 N/mm), a parità di densità secca. Questo effetto è ancora più marcato nel caso delle miscele MIX2CBD\_DMAX025 e MIX2CBD\_DMAX05, in cui la seconda, che presenta una sabbia leggermente più grossolana, ha raggiunto un valore dell'energia di frattura (0,053 N/mm) nettamente superiore rispetto al valore raggiunto dalla prima (0,043 N/mm).

La miscela MIX4, in cui è stata utilizzata solo sabbia granita, ha presentato un valore dell'energia di frattura piuttosto elevato, che si è discostato dall'incremento lineare dell'energia di frattura all'aumentare della densità secca, riscontrato nelle altre miscele.

L'utilizzo di una differente tipologia di tensioattivo ha avuto effetti anche sull'energia di frattura: la miscela in cui è stato utilizzato il tensioattivo Cbd (MIX2\_CBD), con una densità target pari a 1450 kg/m<sup>3</sup>, ha ottenuto un valore dell'energia di frattura pari a quello ottenuto dalla miscela in cui è stato utilizzato il tensioattivo Foamin (MIX2), che presentava invece una densità target più alta e pari a 1600 kg/m<sup>3</sup>. Il tensioattivo che, in questo caso, ha permesso di ottenere il più alto valore dell'energia di frattura è stato l'Isocem, la cui miscela (MIX2\_ISOCEM) ha raggiunto un valore dell'energia di frattura pari a 0,043 N/mm, nettamente superiore rispetto quello raggiunto dalla miscela MIX2\_CBD, a parità di densità secca target (1450 kg/m<sup>3</sup>). La miscela MIX2\_ISOCEM è stata inoltre la miscela che ha raggiunto il maggiore valore dell'energia di frattura tra tutte le altre miscele con la stessa densità secca target (1450 kg/m<sup>3</sup>).

Le miscele ottimizzate, M2CBD025 OTT e M2CBD025 OTT+T, in cui è stata utilizzata una sabbia con una dimensione massima delle particelle pari a 0,25 mm, hanno raggiunto dei valori di energia di frattura davvero interessanti. La miscela M2CBD025\_OTT, con una densità secca target pari a 1550 kg/m<sup>3</sup>, ha raggiunto un valore dell'energia di frattura pari a 0,06 N/mm, che è risultato il valore più alto in assoluto dell'energia di frattura raggiunto tra tutte le miscele realizzate. Con la miscela M2CBD025\_OTT+T, in cui è stato aggiunto, rispetto la miscela precedente, del tensioattivo libero, ha raggiunto un valore dell'energia di frattura pari a 0,03 N/mm; quindi, l'aggiunta di tensioattivo libero nella miscela ha portato ad ottenere una riduzione dell'energia di frattura pari al 39,07%, con una riduzione della densità secca target pari a 100 kg/m<sup>3</sup>. Anche in questo caso, come già accaduto nel caso della resistenza a flessione e della resistenza a compressione, nella miscela M2CBD025 AC0,5, in cui è stata aumentata la quantità di acqua introdotta nella miscela, è stato ottenuto un calo delle prestazioni, precisamente una riduzione dell'energia di frattura pari al 45,46%, rispetto la miscela M2CBD025 OTT, con una riduzione della densità pari a 50 kg/m3.

La riduzione del rapporto sabbia/cemento ha portato ad ottenere interessanti valori d'energia di frattura pur avendo bassi valori della densità target. La miscela M2CBD025\_1,5\_OTT+T ha raggiunto un valore dell'energia di frattura pari a 0,034 N/mm con una densità secca target pari a 1300 kg/m<sup>3</sup> mentre, la miscela M2CBD025\_1,8\_OTT+T ha raggiunto un valore dell'energia di frattura pari a 0,041 N/mm con una densità secca target pari a 1400 kg/m<sup>3</sup>.

#### 3.2.4 Conclusioni finali e scelta della miscela

Mediante questo studio sperimentale si è riusciti a realizzare una miscela di calcestruzzo schiumato (M2CBD025 OTT) che presenta delle proprietà meccaniche davvero interessanti: un valore della resistenza a compressione che supera il valore minimo di 25 MPa richiesto per un utilizzo in ambito strutturale, significativi miglioramenti dell'energia di frattura se paragonata a tutte le altre miscele realizzate, con un valore dell'energia di frattura ottenuto che supera quello di tutte le altre miscele realizzate aventi anche densità maggiori e miglioramenti anche in termini di capacità flessionali. Per la realizzazione della miscela (M2CBD025 OTT), e quindi per il raggiungimento di tali risultati, è stato ridotto il diametro massimo della sabbia, inoltre è stata anche migliorata la consistenza della miscela e la sua stabilità mediante l'incremento della fase fluida. È stata quindi ottenuta una miscela con una buona stabilità, caratterizzata da un sistema di vuoti costituito da bolle di piccole dimensioni e con una distribuzione omogenea delle bolle, in termini di dimensioni e forma delle bolle stesse; il sistema di bolle così caratterizzato, permette di generare una superficie di frattura più tortuosa e, quindi, un materiale che riesce a dissipare una notevole energia. Queste sono state le principali motivazioni che hanno spinto alla scelta di questa miscela rispetto alle altre; è stata quindi utilizzata, come si vedrà nel successivo capitolo, per la parte applicativa, in cui viene studiata la risposta sismica strutturale di diverse strutture realizzate con due tipologie di calcestruzzo: calcestruzzo schiumato (miscela M2CBD025 OTT) e calcestruzzo ordinario di paragonabile resistenza a compressione.

# **Capitolo 4**

# 4 Fase progettuale

#### 4.1 Accenni teorici di ingegneria sismica

Per una migliore comprensione dei risultati che verranno mostrati in seguito, relativi alla risposta sismica delle strutture analizzate, vengono prima riportati dei cenni riguardo i concetti base dell'ingegneria sismica, relativi alla risposta strutturale di strutture soggette ad azione sismica. Per fare questo, inizialmente viene analizzata la risposta sismica di un oscillatore semplice, in quanto rappresenta, in assoluto, la tipologia strutturale più semplice, per poi passare all'analisi della risposta sismica di un sistema a più gradi di libertà, introducendo i concetti basilari dell'analisi modale.

Il sisma si presenta sottoforma di moto del terreno e, nel caso in cui ci fosse in tale terreno la presenza di una struttura, entrerebbe anch'essa in moto; si instaurerebbe pertanto un moto relativo tra la struttura ed il terreno. Risulta pertanto necessario distinguere lo spostamento del terreno ug(t) dallo spostamento della struttura rispetto al terreno u(t). Consideriamo pertanto un oscillatore semplice, ovvero un sistema ad un grado di libertà, come quello riportato in Figura 4.1:



Figura 4.1: Sistema ad un grado di libertà [30]

Tale sistema, risulta caratterizzato da una massa concentrata *m* posizionata in alto, all'estremità di una colonna elastica di rigidezza k e massa trascurabile.

Come accennato prima, andando a considerare un sistema inerziale fisso, l'eccitazione sismica può essere considerata come uno spostamento orizzontale del terreno  $x_g(t)$ ; a causa di tale spostamento del terreno, anche la struttura inizierà a muoversi (moto oscillatorio) in relazione alle sue caratteristiche di massa e di rigidezza. Il moto della struttura può essere descritto in termini di spostamento, velocità ed accelerazione. Lo spostamento relativo della struttura rispetto al terreno viene indicato con u(t) mentre, le componenti assolute del moto del sistema, in termini di spostamento, velocità ed accelerazione vengono di seguito riportate [31]:

- spostamento assoluto:

$$x(t) = u(t) + x_g(t) \tag{13}$$

- velocità assoluta:

$$\dot{x}(t) = \dot{u}(t) + \dot{x}_g(t) \tag{14}$$

- accelerazione assoluta:

$$\ddot{x}(t) = \ddot{u}(t) + \ddot{x}_g(t) \tag{15}$$

dove:

- $\dot{u}(t) \in \ddot{u}(t)$ : velocità e accelerazione relativa della struttura rispetto al terreno
- $\dot{x}_q(t) \in \ddot{x}_q(t)$ : velocità e accelerazione del terreno

Dall'applicazione della seconda legge di Newton è possibile ricavare l'equazione di equilibrio del sistema [31]:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = 0 \tag{16}$$

In tale equazione compaiono la forza d'inerzia  $F_i$ , la forza di smorzamento viscoso  $F_v$  e la forza di richiamo elastica  $F_s$ , ovvero le forze a cui è soggetto il sistema strutturale.

Introducendo lo smorzamento relativo  $\xi$ , la frequenza propria della struttura  $\omega$  e separando la componente di accelerazione del terreno dalla componente di accelerazione della massa della struttura, la precedente equazione può essere scritta nella seguente forma [31]:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega\dot{u}(t) + \omega^2 u(t) = -\ddot{x}_g(t)$$
(17)

dove:

$$- \xi = \frac{c}{c_r}$$
$$- \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [rad/s]$$
$$- T = \frac{2\pi}{\omega} \quad [s]$$

Lo smorzamento relativo è dato quindi dal rapporto tra lo smorzamento della struttura e il valore dello smorzamento critico ( $c_r = 2m\omega$ ), ovvero quel valore di smorzamento tale per cui la risposta della struttura sollecitata non risulta più essere oscillante. Quando, invece, il valore dello smorzamento della struttura risulta essere inferiore al valore dello smorzamento critico, ovvero per valori di  $\xi < 1$ , si avrà una risposta della struttura, se disturbata dal suo stato di quiete, di tipo oscillatorio, con oscillazioni che decrescono man mano nel tempo per via della presenza dello smorzata pari a  $\omega_D = \omega\sqrt{1-\xi^2}$  e periodo proprio  $T_D = T/\sqrt{1-\xi^2}$ . Al contrario, se il valore dello smorzamento risulta essere maggiore di 1, non si avranno più oscillazioni e quindi, la struttura, una volta disturbata dal suo stato di quiete, tornerà nella sua posizione iniziale senza oscillare [31].

Come si nota dalle precedenti formule, la frequenza propria della struttura e quindi anche il periodo proprio, dipendono dalla rigidezza e dalla massa della struttura; conoscendo quindi i valori di tali parametri, si è in grado di comprendere come la struttura si comporta se sollecitata da un sisma.

Nelle strutture in cemento armato il valore dello smorzamento risulta essere pari a circa il 5% rispetto al valore dello smorzamento critico e questo permette di poter considerare pari ad 1 il termine  $\sqrt{1-\xi^2}$ . Di conseguenza, è possibile porre  $\omega_D = \omega$  e  $T_D = T$ , considerando in tal modo trascurabile l'effetto dello smorzamento nei parametri che caratterizzano la risposta sismica della struttura.

La soluzione dell'equazione del moto del sistema (17) è la seguente [31]:

$$u(t) = \frac{1}{\omega} \int \ddot{x}_g(\tau) e^{-\xi} (t-\tau) \sin\omega(t-\tau) d\tau$$
(18)

Tale equazione prende il nome di Integrale di Duhamel.

Derivando l'equazione (18) è possibile poi ricavare la velocità relativa e sostituendo, lo spostamento relativo e la velocità relativa nella seguente equazione del moto del sistema (19), si ottiene il valore dell'accelerazione assoluta del sistema:

$$\ddot{x} = -\omega^2 u - 2\omega \xi \dot{u} \tag{19}$$

Quando una struttura è soggetta ad una forzante di tipo periodico può subire un effetto più o meno amplificato in relazione alle sue caratteristiche e a quelle della forzante. Considerando ad esempio il caso di un oscillatore semplice soggetto ad una forzante dinamica di tipo armonico, avente una certa frequenza e un certo periodo, si avrà una risposta, in termini di spostamento, che sarà composta principalmente da due componenti: una stazionaria ed una transitoria. La componente transitoria, come si deduce dal nome, si riduce esponenzialmente, fino a sparire, per effetto dello smorzamento mentre, la componente stazionaria permane finché risulta applicata la forzante nella struttura. La componente stazionaria dello spostamento è data dal prodotto di due fattori: lo spostamento statico, ovvero lo spostamento che subirebbe la struttura se la forzante armonica fosse applicata con il suo valore massimo in modo statico (senza oscillazione) e il fattore di amplificazione, che amplifica o riduce il valore dello spostamento statico in relazione allo smorzamento, alla freguenza propria della struttura e alla frequenza della forzante [30]. Viene di seguito riportato nella Figura 4.2, un grafico che mette in relazione la risposta, in termini di spostamento, dell'oscillatore semplice per effetto di una forzante con un certo periodo assegnato, in relazione al periodo dell'oscillatore semplice:



Figura 4.2: Diagramma di amplificazione dello spostamento di un oscillatore semplice soggetto ad una forzante armonica [30]

Come si nota dal grafico in Figura 4.2, la risposta della struttura varia in funzione del suo periodo, subendo delle amplificazioni molto importati per certi valori del periodo. La massima amplificazione si ha quando il periodo proprio della struttura si avvicina al periodo della forzante (fenomeno di risonanza), portando addirittura ad uno spostamento infinito in caso di assenza di smorzamento. Ecco quindi che, al variare della rigidezza o della massa della struttura, si modifica il periodo proprio della struttura che comporta quindi un comportamento differente della struttura per una certa forzante applicata. Quando una struttura è caratterizzata da una rigidezza molto elevata, ci si

ritrova alla sinistra del picco, quindi si avrà uno spostamento che tenderà sempre più allo spostamento statico all'aumentare della rigidezza e, nel caso estremo di struttura infinitamente rigida (T = 0) lo spostamento risulterebbe uguale a quello statico; mentre, nel caso di strutture molto deformabili, ci si ritrova alla destra del picco, in cui si ottiene uno spostamento sempre più piccolo al diminuire della rigidezza fino ad arrivare al caso estremo di struttura infinitamente deformabile (T ->  $\infty$ ) oppure con massa infinita, in cui lo spostamento si annulla [30]. Accade la stessa cosa anche alle accelerazioni. Ecco come le caratteristiche di rigidezza e di massa della struttura ne possono influenzare il comportamento in relazione ad una certa forzante periodica. Nel caso del sisma diventa tutto più difficile in quanto il moto del terreno non sarà perfettamente armonico ma il segnale, in termini di accelerazione e tempo, rilevato dagli accelerogrammi sarà piuttosto irregolare, non esiste quindi un calcolo di tipo analitico per determinare la risposta della struttura ma bisognerà procedere per via numerica.

Ritornando a quanto ottenuto prima mediante le equazioni (18) e (19) ovvero le componenti del moto del sistema (spostamento relativo e accelerazione assoluta), il passo successivo consiste nel calcolare le azioni agenti sulla struttura in modo da poter verificare se la struttura risulta in grado di sopportarle.

L'effetto del sisma, per la determinazione delle sollecitazioni interne della struttura, viene considerato come una forza statica equivalente applicata alla struttura, che andrà a produrre nella struttura gli stessi spostamenti ottenuti mediante la risoluzione dell'equazione del moto:

$$F_s = ku(t) = m\omega^2 u(t) = ma(t)$$
<sup>(20)</sup>

dove:

- k è la rigidezza della struttura
- u(t) è il valore dello spostamento relativo in funzione del tempo
- $\omega^2$  è la frequenza propria del sistema
- a(t) è la pseudo-accelerazione

Risulta pertanto possibile determinare le sollecitazioni interne della struttura mediante l'ausilio di un'analisi statica, eseguita per ogni istante di tempo.

Considerando il valore dello smorzamento relativo  $\xi$  nullo, dall'equazione (19) si ottiene il valore della pseudo-accelerazione a(t), il cui valore assoluto coincide con quello dell'accelerazione assoluta; tale ipotesi risulta plausibile in quanto le strutture in cemento armato risultano caratterizzate da valori di smorzamento molto bassi [31].

Quello che interessa ad un progettista, per la verifica e/o il progetto della struttura, non è il valore delle sollecitazioni al variare del tempo ma i valori massimi delle sollecitazioni che subisce la struttura per effetto del sisma. Pertanto, risulta necessario, ai fini progettuali, conoscere il valore massimo della pseudo-accelerazione in modo da poter calcolare la forza statica massima da applicare alla struttura e determinare in tal modo le massime sollecitazione apportate alla struttura dall'evento sismico [31]:

$$F_s^{max} = m\omega^2 u^{max} = ma^{max} \tag{21}$$

I parametri che influenzano il moto libero di un oscillatore semplice sono il periodo T e lo smorzamento  $\xi$  e questo vale anche nel caso in cui al sistema fosse applicata una forzante o fosse soggetto ad un evento sismico. Inoltre, l'effetto del sisma, in termini di spostamento e accelerazione, risulta essere sempre lo stesso per strutture differenti ma che presentano gli stessi valori dello smorzamento  $\xi$  e del periodo T [30]. Per tale motivo risulta fondamentale conoscere i valori massimi degli spostamenti e delle accelerazioni indotte su sistemi ad 1 grado di libertà, al variare del periodo T del sistema e andando a diagrammare tutti questi valori si ottiene il cosiddetto spettro di risposta elastico [31]. Tale spettro può essere realizzato per tutti i parametri sismici, ovvero: spostamento relativo, pseudo-velocità relativa e pseudo-accelerazione assoluta. Viene di seguito riportato un esempio di spettro elastico relativo ai valori di pseudo-accelerazione:



Figura 4.3: Spettro di risposta elastico in termini di pseudo-accelerazione [30]

Dalla Figura 4.3, si può notare come l'accelerazione si amplifica, rispetto quella del terreno, per alcuni valori del periodo. Quando il periodo T è nullo, il sistema sarà soggetto al massimo valore di accelerazione del suolo (peak ground acceleration), in quanto risulterebbe nullo il moto relativo della massa dell'oscillatore rispetto al suolo. Si può notare che lo spettro è caratterizzato dall'avere una zona in cui si presentano le massime amplificazioni; questo è correlato al fenomeno della risonanza, ovvero

l'amplificazione diventa massima quando il periodo si avvicina al periodo proprio della struttura. Oltre tale zona di estrema amplificazione, lo spettro presenta, all'aumentare del periodo T, valori di amplificazione sempre inferiori, fino a raggiungere quasi l'annullamento dell'accelerazione nel caso di periodi molto elevati e quindi per strutture molto deformabili. Come riscontrato anche in questo caso, la massa e la rigidezza della struttura giocano un ruolo fondamentale nella risposta sismica della struttura, in quanto modificano il valore del periodo T e quindi l'amplificazione dell'effetto sismico sulla struttura.

#### Comportamento dinamico dei sistemi a più gradi di libertà

Non tutte le strutture sono riconducibili ad un oscillatore semplice, motivo per il quale risulta necessario studiare il comportamento dei sistemi caratterizzati da più gradi di libertà. Nel caso di edifici in cemento armato, è possibile considerare come tipologia strutturale quella del telaio multipiano. Solitamente, negli edifici, è possibile considerare le masse concentrate in corrispondenza dei solai, trascurando pertanto la distribuzione della massa in altezza; inoltre, gli edifici in cemento armato sono caratterizzati dall'avere degli impalcati con una notevole rigidezza, motivo per il quale è possibile considerarli infinitamente rigidi nel piano. Questo comporta una notevole semplificazione nel calcolo, in quanto si ottiene una riduzione dei gradi di libertà, che diventano pari a tre per ogni piano. In questo modo, in un edificio multipiano in cemento armato, con *n* impalcati, il numero dei gradi di libertà risulterà pari a 3*n* [30].

Considerando il caso delle oscillazioni libere, in un sistema a più gradi di libertà non si avrà più un'unica equazione del moto ma si avranno *n* (gradi di libertà) equazioni del moto, che si ricavano imponendo l'equilibrio dinamico:

$$[M]{\ddot{u}} + [K]{u} = \{0\}$$
(22)

Si ottiene pertanto un sistema di equazioni differenziali, dove:

- [M] è la matrice delle masse
- [K] è la matrice delle rigidezze
- $\{\ddot{u}\}$  è il vettore delle accelerazioni
- $\{u\}$  è il vettore degli spostamenti

Il sistema ha una soluzione di questo tipo:

$$\{u(t)\} = \{\Psi\}\cos(\omega t) \tag{23}$$

Ovvero una funzione armonica con frequenza angolare  $\omega$ .

Andando a sostituire tale soluzione nell'equazione (22), si ottiene la seguente equazione:

$$[K]\{\Psi\} - \omega^2\{\Psi\} = \{0\}$$
(24)

L'equazione (24) presenta soluzioni non banali qualora fosse verificata la seguente condizione:

$$\det([K] - \omega^2[M]) = \{0\}$$
(25)

L'equazione (25), non è altro che un'equazione polinomiale di ordine n. Le incognite di tale equazione sono gli n valori di  $\omega_i$  che rappresentano le n frequenze angolari relative agli n modi di oscillazione libera. Dal punto di vista matematico, si tratta quindi di andare a determinare gli autovalori  $\omega_i$  (frequenze angolari), per poi sostituirli nella (24) andando a determinare gli autovettori { $\Psi$ }<sub>i</sub> [30].

Gli autovettori  $\{\Psi\}_i$  sono linearmente indipendenti e risultano essere ortogonali rispetto alla matrice delle masse e delle rigidezze; questo permette di avere le matrici delle masse e delle rigidezze diagonali.

In tal modo, ricavati i valori delle frequenze proprie del sistema  $\omega_i$  e quindi i relativi periodi propri della struttura T<sub>i</sub>, risulta possibile determinare gli autovettori $\{\Psi\}_i$ ; difatti, ad ogni periodo risulta associato un autovettore che, a meno di una costante, definisce uno degli n modi propri di vibrare della struttura [31].

Nel caso di struttura soggetta ad un input sismico, la condizione di equilibrio dinamico, in forma matriciale, considerando anche lo smorzamento, si presenta in questo modo [30]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_{g}$$
(26)

Andando inoltre ad esprimere gli spostamenti in funzione delle deformate modali ed introducendo delle particolari coordinate generalizzate (coordinate principali q<sub>i</sub>), si ottengono *n* equazioni disaccoppiate:

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = -\Gamma_j \ddot{u}_g \tag{27}$$

dove j rappresenta il modo di vibrare preso in considerazione e  $\Gamma_j$  è il coefficiente di partecipazione modale relativo al j-esimo modo.

L'equazione (27) è pertanto un'equazione del moto relativa al j-esimo modo di vibrare. L'introduzione delle coordinate principali permette quindi di passare da un sistema di equazioni differenziali accoppiate ad un sistema di equazioni del moto tra loro indipendenti, ognuna relativa ad ogni singolo modo di vibrare della struttura, con un solo grado di libertà che è rappresentato dalla j-esima coordinata principale  $q_j$ . Questo permette, all'atto pratico, di considerare la struttura come se fosse costituita da un insieme di oscillatori semplici ad un solo grado di libertà che collaborano per determinare il comportamento globale della struttura [31]. Il coefficiente di partecipazione modale  $\Gamma_j$  permette di comprendere la rilevanza del contributo del j-esimo modo di vibrare al moto complessivo del sistema [30].

Attraverso l'analisi modale, si riesce quindi a scomporre la risposta sismica di una struttura nel contributo dei singoli modi di vibrare. Per verificare e/o progettare una struttura è necessario determinare i massimi contributi dei singoli modi, in modo da poter determinare poi le massime forze corrispondenti, da applicare alla struttura.

Per calcolare quindi gli spostamenti massimi, si fa riferimento agli spettri, dai quali si ricava il valore della pseudo-accelerazione in relazione al periodo  $T_j$  del j-esimo modo di vibrare:

$$u_{j,max} = \{\Psi\}_j q_{j,max} = \{\Psi\}_j \frac{\Gamma_j S_e(T_j)}{\omega_j^2}$$
(28)

Come si nota dalla formula (28), il massimo valore della coordinata principale viene calcolato attraverso il valore della pseudo-accelerazione ricavato dallo spettro, in relazione al periodo  $T_j$ , relativo al j-esimo modo di vibrare considerato e scalato dal coefficiente di partecipazione modale  $\Gamma_j$ .

Per determinare le massime sollecitazioni nella struttura, generate dal j-esimo modo di vibrare, si vanno ad applicare alla struttura delle forze che si ottengono dal prodotto tra la matrice delle masse e il massimo valore dell'accelerazione [30]:

$$F_{sj} = [M]\{\Psi\}_j \Gamma_j S_e(T_j)$$
<sup>(29)</sup>

Calcolate le forze statiche, risulta poi possibile calcolare il taglio alla base [31]:

$$V_b(t) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n Fsij(t) = \sum_{j=1}^n \frac{\left(\{\Psi\}_j^T[M]\right)^2}{M_j^*} \omega_j^2 q_j(t)$$
(30)

La forza  $F_{sij}(t)$  è la forza statica relativa al j-esimo modo di vibrare che agisce nell'iesimo piano della struttura [31].

Il termine:

$$\widetilde{M}_j = \frac{\left(\{\Psi\}_j^T[M]\right)^2}{M_j^*} \tag{31}$$

ha le dimensioni di una massa e viene chiamata massa partecipante. Andando a moltiplicare l'ordinata modale per la massa partecipante, relativa al j-esimo modo, si ottiene il taglio alla base relativo al j-esimo modo. Ad ogni modo di vibrare, risulterà quindi associata una massa partecipante, ed esprimendo tale massa come percentuale della massa totale della struttura, si ottiene il contributo del singolo modo di vibrare alla risposta complessiva della struttura. A differenza del coefficiente di partecipazione modale, la massa partecipante non dipende da come è stata scalata la deformata modale [30]. È possibile quindi calcolare il massimo valore del taglio alla base, relativo al j-esimo modo di vibrare, andando a moltiplicare il valore della massa partecipante relativa al j-esimo modo di vibrare, per il valore spettrale della pseudo-accelerazione, prelevata dallo spettro di risposta in relazione al periodo del j-esimo modo di vibrare [30]:

$$V_{b,j} = \widetilde{M}_j S_e(T_j) \tag{32}$$

Conoscere il valore della massa partecipante relativa ad ogni modo di vibrare ci permette di poter capire quali sono i modi che contribuiscono maggiormente alla risposta globale della struttura e quelli che invece danno un contributo che è possibile trascurare. I modi di vibrare che presentano un valore della massa partecipante inferiore al 5% della massa totale della struttura danno un contributo talmente piccolo da poter essere trascurato; invece, risulta necessario prendere in considerazione un numero di modi di vibrare tale qui la somma delle masse sia almeno pari all'85% della massa totale della struttura [30].

Ottenuto quindi il contributo di ogni singolo modo di vibrare, sia in termini di sollecitazione, sia in termini di spostamenti, il passo successivo è quello di andare a calcolare l'effetto globale apportato da tutti i modi di vibrare alla struttura. Per fare questo, non è possibile procedere mediante una semplice somma di tutti i contributi dei singoli modi di vibrare in quanto, i modi di vibrare, non sono sincroni e quindi non raggiungono i valori massimi dei loro contributi nello stesso istante; pertanto, andando a sommare i contributi di ogni singolo modo di vibrare, si andrebbe a sovrastimare il

contributo complessivo e quindi a sovrastimare l'effetto dell'azione sismica. I contributi dei singoli modi di vibrare devono pertanto essere combinati mediante una combinazione quadratica completa (CQC) [30]:

$$E = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \rho_{j,k} E_j E_k}$$
(33)

dove:

$$\rho_{j,k} = \frac{8\xi^2 (1+\beta_{j,k})\beta_{j,k}^{\frac{3}{2}}}{\left(1-\beta_{j,k}^2\right)^2 + 4\xi^2 \beta_{j,k} (1+\beta_{j,k})^2} \tag{34}$$

- $E_j \in E_k$  possono essere le caratteristiche di sollecitazione in una sezione, gli spostamenti in un punto, ecc., relativi al modo j-esimo e modo k-esimo
- ρ<sub>j,k</sub> è il coefficiente di correlazione tra il modo di vibrare j-esimo e il modo di vibrare k-esimo

# 4.2 Valutazione del comportamento di un calcestruzzo alleggerito nella risposta simica di una struttura in cemento armato

Come accennato nel precedente paragrafo, analizzando prima la risposta dell'oscillatore semplice e poi quella relativa alle strutture a più gradi di libertà, si è visto che sia la massa, sia la rigidezza, influenzano il comportamento sismico delle strutture.

Pertanto, si vuole studiare, in prima approssimazione, l'influenza di un calcestruzzo alleggerito nella risposta sismica strutturale. Nel calcolo, è stata considerata la miscela che ha mostrato le migliori prestazioni, sia allo stato fresco, sia allo stato indurito, tra tutte quelle realizzate nella fase sperimentale. Si tratta di una valutazione preliminare, in quanto, per uno studio più accurato saranno necessarie altre indagini sperimentali, ad esempio relative alla valutazione del modulo elastico e allo studio degli effetti a lungo termine analizzando anche la durabilità del materiale. I risultati ottenuti sono poi stati confrontati con quelli relativi al calcestruzzo tradizionale, in modo da apprezzare gli eventuali vantaggi o criticità.

#### 4.2.1 Modellazione strutturale

Si è deciso di affrontare lo studio su degli edifici in cemento armato potenzialmente ubicati in una zona caratterizzata da una elevata pericolosità sismica. Il sito di interesse oggetto di studio sono è la città di Messina (Longitudine 15°55′731 E; Latitudine 38°18′706 N) che ricade nella zona sismica 1, la quale rappresenta la zona con il più alto rischio sismico nel territorio italiano. Sono stati modellati 6 edifici in cemento armato di cui 3 realizzati utilizzando un calcestruzzo tradizionale e gli altri 3 utilizzando un calcestruzzo alleggerito, per un totale di 6 modelli. Per la realizzazione dei modelli e per il calcolo strutturale è stato utilizzato il software CDSWin. Le strutture analizzate sono tutte simmetriche e a pianta rettangolare mentre, i vari modelli si differenziano per il numero di piani; variano inoltre, tra un modello ed un altro, le sezioni degli elementi strutturali.

Le strutture sono state progettate con una vita nominale  $\geq$  50 anni e su un suolo di Categoria B, ovvero "rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti" [32].

Vengono di seguito riportati gli spettri e i parametri sismici, ottenuti tramite il software CDSWin, relativi al sito di interesse nella città di Messina:



Figura 4.4: Spettro di risposta elastico relativo al sito dove sono ubicate le strutture, nella città di Messina

Stato Limite	Tr	ag=Ag/g	F.	T*c
Operativitá (SLO)	30	0.061	2.358	0.277
Danno (SLD)	50	0.082	2.314	0.293
Salvag. Vita (SLV)	475	0.25	2.411	0.359
Collasso (SLC)	975	0.339	2.447	0.384

Parametri di Pericolositá Sismica

Figura 4.5: Parametri di pericolosità sismica relativi al sito dove sono ubicate le strutture, nella città di Messina

## 4.2.1.1 Strutture in calcestruzzo tradizionale

Come accennato prima, sono state realizzate tre differenti tipologie di strutture per ciascuna tipologia di calcestruzzo. Tutte le strutture presentano una pianta rettangolare di dimensioni 25,6 m X 15,6 m e un numero di campate pari a cinque nella direzione X e pari a tre nella direzione Y. Le campate hanno tutte una lunghezza pari a 5 m.

È stato scelto di adottare una copertura piana per tutte le strutture. I solai sono orditi nella direzione trasversale e presentano tutti una soletta collaborante di spessore pari a 5 cm in modo da ottenere un comportamento diaframmatico.

La tipologia strutturale è quella a telaio; non vi è pertanto la presenza di alcun setto in cemento armato.

Vengono di seguito riportate le caratteristiche dei materiali utilizzati per i vari elementi strutturali.

#### Caratteristiche dei materiali:

Per tutti gli elementi strutturali è stato utilizzato un calcestruzzo di classe C25/30. Vengono di seguito riassunte, in forma tabellare, le principali caratteristiche del calcestruzzo utilizzato:

Calcestruzzo C25/30					
γ [kg/cm²]	2500				
E [kg/cm <sup>2</sup> ]	314758				
v	0,2				
f <sub>cm</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	200				

Tabella 4.1: Proprietà meccaniche calcestruzzo tradizionale

Le armature sono tutte state realizzate attraverso l'utilizzo di barre e staffe ad aderenza migliorata, realizzate con un acciaio B450C.

# Analisi dei carichi:

# Pareti esterne ed interne:

Le chiusure esterne sono state realizzate attraverso le pareti di tamponatura costituite da una muratura in laterizio, rifinite all'interno con un intonaco a gesso mentre all'esterno è stato adottato un rivestimento in klinker. Bisogna inoltre precisare che nel modello a nove piani, per via della differente altezza delle travi nei vari piani, le pareti di tamponatura non presentano tutte la stessa altezza e questo comporta una variazione del peso al metro lineare. Vengono di seguito riportati, in forma tabellare, i carichi di ogni singolo materiale che costituisce la stratigrafia della parete di tamponatura. Vengono riportate due tabelle di cui, una (Tabella 4.3) relativa alle pareti di tamponatura utilizzate nei primi cinque piani del modello a nove piani e un'altra (Tabella 4.2) relativa alle pareti di tamponatura degli ultimi quattro piani (6°, 7°, 8° e 9°) del modello a nove piani e alle pareti di tamponatura utilizzate in tutti i piani delle altre due tipologie di modello (3 piani e 6 piani):

Parete di tamponatura Densità [kg/m3] Peso [kN/m2] Muratura in mattoni forati 11 2,750 12 Intonato interno a gesso 0,180 **Rinzaffo lisciato** 19 0,190 Collante per rivestimento 0,005 Rivestimento esterno (klinker) 17 0,255 Arrotondamento 0,020 Totale 3,400 Incidenza aperture 20% Altezza [m] Peso al metro lineare [kN/m] 2,6 7,072

Tabella 4.2: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura nelle strutture in calcestruzzo tradizionale
	Parete di tamponatura					
	Densità [kg/m³] Peso [k					
	Muratura in mattoni forati	11	2,750			
	Intonato interno a gesso	12	0,180			
	Rinzaffo lisciato	19	0,190			
	Collante per rivestimento		0,005			
	Rivestimento esterno (klinker)	17	0,255			
	Arrotondamento		0,020			
Totale			3,400			
	Incidenza aperture					
	20%					
	Altezza [m]	Peso al metro li	neare [kN/m]			
	2,5	6,80	0			

Tabella 4.3: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura dei primi cinque piani relative al modello a nove piani della struttura in calcestruzzo tradizionale

Per le pareti divisorie interne sono stati considerati dei classici tramezzi realizzati con mattoni forati spessi 8 cm, rifiniti in entrambi i lati con intonato per ambienti interni. Vengono di seguito riportati i carichi di ogni materiale che costituisce la stratigrafia delle pareti divisorie interne:

Tabella 4.4: Analisi dei carichi delle pareti divisorie interne relative strutture in calcestruzzo tradizionale

Partizioni mobili (tramezzi)					
	Densità [kg/m <sup>3</sup> ] Peso [kN/m <sup>2</sup> ]				
	Intonaco	20	0,80		
	Muratura forati	11	0,88		
Totale			1,68		
	Altezza [m] Peso al metro lineare [kN/m]				
	2,75	4,62	2		
	Peso al m <sup>2</sup> [kN/m2]				
	2,00				

Il peso al metro quadro dei tramezzi è stato determinato a partire dal peso calcolato al metro lineare e facendo poi riferimento alla tabella relativa ai carichi permanenti non strutturali riportata nella normativa NTC2018 [32].

#### Solaio:

Si è scelto di utilizzare un solaio in latero-cemento con uno spessore pari a 25 cm. Il solaio presenta una soletta collaborante di spessore pari a 5 cm che garantisce il comportamento diaframmatico.

Vengono di seguito riportati, in forma tabellare, i pesi di ciascun componente del solaio e quindi i carichi di progetto: carico permanente strutturale  $g_{1k}$ , carico permanente portato  $g_{2k}$  e il carico variabile  $q_k$  in funzione della destinazione d'uso, che in questo caso è quella residenziale.

Tabella 4.5: Analisi dei carichi del solaio in latero-cemento nelle strutture in calcestruzzo tradizionale

	Solaio			
		Densità [kg/m3]	Peso [kN/m2]	
	Soletta	25	1,25	
	Travetti	25	1,20	
	Pignatte	8	1,20	
	Incidenza cordoli		0,50	
g1k			4,15	
	Intonaco intradosso	20	0,40	
	Massetto pavimenti	20	0,80	
	Pavimento	27	0,54	
	Partizioni mobili (tramezzi)		2,00	
g2k			3,74	
qk			2,00	

#### Carico neve:

Il carico neve è stato calcolato in funzione della località in cui risultano potenzialmente ubicate le strutture; sono stati pertanto calcolati due valori del carico neve, uno relativo alla città di Torino e l'altro relativo alla città di Messina.

Vengono di seguito riportati, in forma tabellare, i valori del carico neve calcolato per la città di Messina:

Tabella 4.6: Carico neve	calcolato nella	città di Messina
--------------------------	-----------------	------------------

Carico neve città di Messina		
Zona geografica III		
Altezza S.L.M. 3		
Tipo Esposizione Normale		

Coeff. Termico	1
Coeff. Forma	0,8
Tempo Rit. (anni)	50
Coeff. Esposizione	1
Q <sub>neve</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	48

#### **Descrizione strutture:**

#### <u>Modello a 3 piani</u>

Nel modello a tre piani sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 50 cm, uguali per tutti i piani. I pilastri utilizzati sono a sezione quadrata di dimensioni 40 X 40 cm ed a sezione costante per tutta l'altezza dell'edificio. La struttura di fondazione è costituita da travi di fondazione a sezione rettangolare di dimensioni 50 X 60 cm.

#### <u>Modello a 6 piani</u>

Nel modello a tre piani sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 50 cm, uguali per tutti i piani. A differenza del modello a tre piani, in questo caso, sono stati utilizzati dei pilastri a sezione quadrata ma con de differenti dimensioni: nel primo e nel secondo piano, sono stati utilizzati dei pilatri a sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm mentre, per i restanti piani (3°,4° 5° e 6°) sono stati utilizzati dei pilastri a sezione quadrata dei pilastri a sezione quadrata di dimensioni 40 X 40 cm. La struttura di fondazione è costituita da travi di fondazione a sezione rettangolare di dimensioni 50 X 60 cm.

#### <u>Modello a 9 piani</u>

A differenza dei precedenti due modelli, nel modello a nove piani le dimensioni delle sezioni delle travi variano nei vari piani, precisamente: nei primi tre piani, sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 40 X 50 cm, dal quarto e al sesto piano, sono state invece utilizzate travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 50 cm, infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 50 cm, infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 40 cm. Come nel modello a sei piani, anche in questo caso si è scelto di utilizzare dei pilastri con differenti dimensioni tra i vari piani: nei primi due piani i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 60 X 60 cm, dal terzo al sesto piano i pilastri hanno invece una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 40 X 60 cm, dal terzo al sesto piano i pilastri hanno invece una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensi pilastri hanno

dimensioni 40 X 40 cm. La struttura di fondazione è stata realizzata mediante delle travi di sezione rettangolare di dimensioni 60 X 100 cm.

## 4.2.1.2 Strutture in calcestruzzo alleggerito

## Caratteristiche dei materiali:

Per la realizzazione di tutti gli elementi strutturali in cemento armato è stato utilizzato un calcestruzzo schiumato; precisamente, è stata scelta la miscela M2CBD025\_OTT, ovvero la miscela che ha mostrato le migliori proprietà meccaniche tra tutte le miscele realizzate durante la fase sperimentale. Per il calcolo del modulo elastico è stata utilizzata la seguente formula sperimentale, utilizzando come valore della resistenza a compressione  $f_c$  [21], il valore di progetto pari a 22 MPa:

$$E = 0.42 f_c^{1.18} \tag{35}$$

Vengono di seguito riportate, in forma tabellare, le proprietà meccaniche principali utilizzate nel calcolo, relative alla miscela di calcestruzzo schiumato utilizzata:

Calcestruzzo schiumato			
γ [kg/cm <sup>2</sup> ] 1550			
E [kg/cm <sup>2</sup> ] 164378,86			
ν	0,2		
f <sub>cm</sub> [kg/cm <sup>2</sup> ]	331,2051		

Tabella 4.7: Proprietà meccaniche relative al calcestruzzo schiumato

Le armature sono tutte state realizzate mediante l'utilizzo di barre e staffe ad aderenza migliorata, realizzate con un acciaio B450C.

## Analisi dei carichi:

## <u>Pareti esterne ed interne</u>:

Le chiusure esterne sono state realizzate attraverso le pareti di tamponatura che, a differenza delle strutture in calcestruzzo tradizionale, sono state alleggerite mediante l'utilizzo di blocchi in calcestruzzo alleggerito al posto dei laterizi. Anche in questo caso, le pareti di tamponatura sono state rifinite internamente con un intonaco a gesso mentre esternamente il rivestimento è stato alleggerito sostituendo al klinker delle piastrelle alleggerite. Bisogna inoltre precisare che, nel modello a nove piani, per via della differente altezza delle travi nei vari piani, le pareti di tamponatura non presentano tutte la stessa altezza e questo comporta una variazione del peso al metro lineare. Vengono di seguito riportati, in forma tabellare, i carichi di ogni singolo materiale che costituisce la stratigrafia della parete di tamponatura. Vengono riportate due tabelle di cui, una (Tabella 4.9) relativa alle pareti di tamponatura utilizzate nei primi cinque piani del modello a nove piani e un'altra (Tabella 4.8) relativa alle pareti di tamponatura degli ultimi quattro piani (6°, 7°, 8° e 9°) del modello a nove piani e alle pareti di tamponatura utilizzate in tutti i piani delle altre due tipologie di modello (3 piani e 6 piani):

Tabella 4.8: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura nelle strutture in calcestruzzo schiumato

	Parete di tamponatura				
	Densità [kg/m <sup>3</sup> ] Peso [kN				
	Blocchi calcestruzzo alleggerito	6	1,500		
	Intonato interno a gesso	12	0,180		
	Rinzaffo lisciato	19	0,190		
Collante per rivestimento			0,005		
	Rivestimento esterno (klinker)	9	0,135		
	Arrotondamento		0,020		
Totale			2,030		
	Incidenza aperture				
	20%				
	Altezza [m]	Peso al metro li	neare [kN/m]		
	2,6	4,22	2		

Tabella 4.9: Analisi dei carichi delle pareti di tamponatura dei primi cinque piani relative al modello a nove piani della struttura in calcestruzzo schiumato

	Parete di tamponatura					
		Densità [kg/m³]	Peso [kN/m²]			
	Blocchi calcestruzzo alleggerito	6	1,500			
	Intonato interno a gesso	12	0,180			
	Rinzaffo lisciato	19	0,190			
Collante per rivestimento			0,005			
	Rivestimento esterno (klinker)	9	0,135			
	Arrotondamento		0,020			
Totale			2,030			
Incidenza aperture						
	20%					
	Altezza [m]	Peso al metro li	neare [kN/m]			
	2,5	4,060				

Come per le pareti di tamponatura, nelle strutture in calcestruzzo schiumato sono state alleggerite anche le pareti divisorie interne utilizzando, al posto dei mattoni forati, dei blocchi in calcestruzzo alleggerito.

Vengono di seguito riportati i carichi di ogni materiale che costituisce la stratigrafia delle pareti divisorie interne:

Tabella 4.10: Analisi dei carichi delle pareti divisorie interne alleggerite relative alle strutture in calcestruzzo schiumato

	Partizioni mobili (tramezzi)				
		Densità [kg/m³]	Peso [kN/m²]		
	Intonaco	20	0,80		
	Blocchi calcestruzzo alleggerito	5	0,4		
Totale			1,2		
	Altezza [m] Peso al metro lineare [kN/m]				
	2,75 <b>3,3</b>				
Peso al m <sup>2</sup> [kN/m2]					
	1,60				

Il peso al metro quadro dei tramezzi è stato determinato a partire dal peso calcolato al metro lineare e facendo poi riferimento alla tabella relativa ai carichi permanenti non strutturali riportata nella normativa NTC2018 [32].

## Solaio:

Nelle strutture in calcestruzzo schiumato è stato alleggerito anche il solaio mediante la sostituzione delle pignatte in laterizio con dei blocchi in calcestruzzo alleggerito. Il solaio anche in questo caso è caratterizzato da uno spessore di 25 cm e presenta una soletta collaborante di spessore pari a 5 cm che garantisce il comportamento diaframmatico.

Vengono di seguito riportati, in forma tabellare, i pesi di ciascun componente del solaio e quindi i carichi di progetto: carico permanente strutturale  $g_{1k}$ , carico permanente portato  $g_{2k}$  e il carico variabile  $q_k$  in funzione della destinazione d'uso, che in questo caso è quella residenziale:

	Solaio alleggerito			
		Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Peso [kN/m <sup>2</sup> ]	
	Soletta	25	1,25	
	Travetti	25	1,20	
	Pignatte	8	1,20	
	Incidenza cordoli		0,50	
<b>g</b> <sub>1k</sub>			4,15	
	Intonaco intradosso	20	0,40	
	Massetto pavimenti	20	0,80	
	Pavimento	27	0,54	
	Partizioni mobili (tramezzi)		2,00	
<b>g</b> <sub>2k</sub>			3,74	
qĸ			2,00	

Tabella 4.11: Analisi dei carichi del solaio alleggerito nelle strutture in calcestruzzo schiumato

#### Carico neve:

Il carico neve è stato considerato uguale a quello adottato per le strutture in calcestruzzo tradizionale, in quanto dipende dalla località in cui sono potenzialmente ubicate le strutture; viene di seguito riportata una tabella (Tabella 4.12) in cui sono riportati solo i valori del carico neve mentre, per i valori dei coefficienti utilizzati nel calcolo sono stati riportati nell'analisi dei carichi relativa alle strutture in calcestruzzo tradizionale:

Tabella 4.12:	Valori	del	carico	neve
---------------	--------	-----	--------	------

Carico neve	
	Q <sub>neve</sub> [kg/m²]
Messina	48

#### **Descrizione delle strutture**

#### <u>Modello a 3 piani</u>

Nel modello a tre piani sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 50 cm, uguali per tutti i piani. I pilastri utilizzati sono a sezione quadrata di dimensioni 40 X 40 cm ed a sezione costante per tutta l'altezza dell'edificio. La

struttura di fondazione è costituita da travi di fondazione a sezione rettangolare di dimensioni 50 X 60 cm, realizzata con un calcestruzzo ordinario di classe C25/30.

#### <u>Modello a 6 piani</u>

Nel modello a tre piani sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 50 cm, uguali per tutti i piani. A differenza del modello a tre piani, in questo caso, sono stati utilizzati dei pilastri a sezione quadrata ma con delle differenti dimensioni: nel primo e nel secondo piano, sono stati utilizzati dei pilastri a sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm mentre, per i restanti piani (3°,4° 5° e 6°) sono stati utilizzati dei pilastri a sezione quadrata di dimensioni 40 X 40 cm. La struttura di fondazione è costituita da travi di fondazione a sezione rettangolare di dimensioni 50 X 60 cm, realizzate in calcestruzzo ordinario di classe C25/30.

#### <u>Modello a 9 piani</u>

A differenza dei precedenti due modelli, nel modello a nove piani le dimensioni delle sezioni delle travi variano nei vari piani, precisamente: nei primi tre piani, sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 40 X 50 cm, dal quarto e al sesto piano, sono state invece utilizzate travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 50 cm, infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), sono state utilizzate delle travi a sezione rettangolare di dimensioni 30 X 40 cm. Come nel modello a sei piani, anche in questo caso si è scelto di utilizzare dei pilastri con differenti dimensioni 60 X 60 cm, dal terzo al sesto piano i pilastri hanno invece una sezione quadrata di dimensioni 50 X 50 cm, ed infine, negli ultimi tre piani (7°, 8° e 9°), i pilastri hanno una sezione quadrata di dimensioni 40 X 40 cm. La struttura di fondazione è stata realizzata mediante delle travi di classe C25/30.

Vengono di seguito riportati, a titolo di esempio, i diagrammi delle sollecitazioni ottenuti dall'analisi modale, da uno dei modelli analizzati, precisamente dal modello a 9 piani in calcestruzzo schiumato:

## <u>Tagli Tx e Ty:</u>



Figura 4.6: Valore del taglio Tx relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo schiumato



Figura 4.7: Valore del taglio Ty relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo schiumato

## <u>Momenti flettenti Mx e My:</u>



Figura 4.8: Valore del momento Mx relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo schiumato



Figura 4.9: Valore del momento My relativo all'edificio di 9 piani in calcestruzzo schiumato

## 4.3 Risultati e discussioni

Dai risultati ottenuti attraverso l'analisi dinamica eseguita su tutti i dodici modelli viene adesso analizzata la differente risposta strutturale in termini di periodo, sollecitazioni massime, spostamenti massimi, massimo valore del taglio alla base. È stata inoltre analizzata la percentuale di armatura necessaria alla verifica di tutti gli elementi strutturali individuando quale tra le due tipologie di calcestruzzo (ordinario o schiumato) portasse ad ottenere un risparmio quantitativo e quindi anche economico.

#### Periodo delle strutture

Viene di seguito riportato un istogramma nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, in cui sono riportati i valori dei periodi fondamentali, ovvero quelli relativi ai primi modi di vibrare di ogni struttura che risulta, nel caso di struttura regolare sia in pianta, sia in altezza, il valore del periodo più significativo rispetto tutti gli altri, associati ai restanti modi di vibrare. Nel grafico in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, vengono quindi riportati i valori del periodo fondamentale relativo a tutte le sei strutture analizzate, al variare del numero di piani e della tipologia di calcestruzzo utilizzata:



Figura 4.10: Istogramma con i valori dei periodi delle strutture al variare dei numeri di piani e del materiale utilizzato

#### Massime sollecitazioni di taglio

Dai risultati ottenuti dall'analisi modale, viene messo in evidenza come l'utilizzo del calcestruzzo schiumato porti in generale ad una riduzione di tutte le caratteristiche di sollecitazione. Vengono di seguito analizzate le riduzioni osservate per differenti tipologie di sollecitazione, precisamente: taglio nella direzione X, taglio nella direzione y. Negli istogrammi riportati nelle FigureFigura 4.11 Figura 4.12, vengono riportati i valori del taglio T<sub>x</sub> e del taglio T<sub>y</sub> ottenuti per tutte le struttura, al variare dei piani e della tipologia di calcestruzzo utilizzata e della località in cui sono potenzialmente ubicate le strutture:



Figura 4.11: Valori del taglio T<sub>x</sub> al variare del numero di piani e della tipologia di calcestruzzo



Figura 4.12: Valori del taglio T<sub>x</sub> al variare del numero di piani e della tipologia di calcestruzzo

### Valori massimi degli spostamenti

Vengono di seguito riportati nelle Figure Figura 4.13 Figura 4.14 i massimi valori degli spostamenti al variare del numero di piani e della tipologia di calcestruzzo utilizzata:



Figura 4.13: Valori degli spostamenti massimi al variare del numero di piani e della tipologia di calcestruzzo



Figura 4.14: Valori degli spostamenti massimi relativi alla combinazione sismica, al variare del numero di piani e della tipologia di calcestruzzo

L'aver utilizzato un calcestruzzo di pari prestazioni meccaniche ma con un modulo elastico più basso va ad influenzare il comportamento sismico perché si va a modificare sia la matrice delle masse, sia la matrice delle rigidezze; questo comportamento implica un incremento del periodo del sistema della struttura a cui corrisponde un decremento delle sollecitazioni sulla struttura stessa come ci si aspettava. Quindi, utilizzando questa tipologia di materiale comporta un risparmio di circa il 30% nella direzione X e di circa il 17% nella direzione Y, in termini di taglio sollecitante che si ripercuote in minori quantità di armatura sulla struttura stessa e quindi su un risparmio globale, a patto di avere maggiori valori degli spostamenti; tuttavia, gli spostamenti rispettano comunque le verifiche allo stato limite di esercizio previste dalla normativa NTC 2018.

## Conclusioni

Dallo studio sperimentale condotto su provini di calcestruzzo fibrorinforzato mediante l'aggiunta di fibre polimeriche, si è riscontrato un effetto benefico, apportato dall'aggiunta delle fibre, soprattutto sulle resistenze residue post picco, facendo acquisire una notevole duttilità al calcestruzzo che, senza la presenza di fibre, risulta avere un comportamento prettamente fragile. Tra le due tipologie di fibre utilizzate, le fibre KM, a parità di dosaggio, sono risultate migliori delle fibre CH, per via della migliore aderenza che si instaura tra le fibre e la miscela cementizia, grazie alla presenza di bugnature sulla superfice delle fibre stesse. Infine, si è anche riscontrato che le fibre KM non compromettono la lavorabilità del materiale, a differenza delle fibre CH.

Dalle prove di flessione eseguite sulle varie miscele di calcestruzzo schiumato realizzate è emersa l'influenza apportata dal diametro massimo delle particelle sulle capacità flessionali. Si è visto infatti che, per via del migliore ingranamento esercitato dalle particelle di diametro maggiore, si riescono ad ottenere migliori capacità flessionali, con un incremento circa pari al 10%. Inoltre, nel caso della resistenza a compressione si è notato, dalle miscele MIX4 e MIX5, in cui è stata utilizzata la sabbia granita (d<sub>max</sub> = 4 mm) sostituendola totalmente (MIX4) e parzialmente (MIX5) alla sabbia fine, che si ottiene un notevole incremento della resistenza senza ottenere grossi benefici di resistenza a compressione; è stato invece riscontrato un incremento notevole dell'energia di frattura. È stato inoltre studiato l'effetto del viscosizzante, il cui incremento ha permesso di ottenere un guadagno generale delle proprietà meccaniche; questo per via della maggiore consistenza acquisita dalla miscela; l'incremento del viscosizzante si traduce in una maggiore forza di confinamento agente sulle bolle, portando ad ottenere un sistema dei vuoti caratterizzato da bolle più piccole e più uniformemente distribuite, ottenendo pertanto un incremento delle proprietà meccaniche.

Mediante l'ottimizzazione delle miscele, effettuata inizialmente adottando una sabbia con un diametro massimo più piccolo, si è riusciti ad ottenere un sostanziale incremento della resistenza a compressione, raggiungendo con le miscele MIX2CBD\_DMAX025 e MIX2CBD\_DMAX05 i più alti valori di resistenza tra tutte le miscele realizzate, raggiungendo però anche i maggiori valori di densità. Successivamente, le miscele sono state ulteriormente ottimizzate mediante l'aumento della fase fluida nella miscela, migliorando in tal modo la fase di miscelazione ed ottenendo inoltre anche una miscela caratterizzata da una migliore stabilità. Le miscela così ottenuta è stata quella che ha raggiunto, in generale, le migliori prestazioni (M2CBD025\_OTT), motivo per il quale è stata utilizzata successivamente per le analisi strutturali di confronto con il calcestruzzo ordinario. La miscela M2CBD025\_OTT ha

infatti raggiunto un valore di resistenza a compressione pari a 32,48 MPa, superando abbondantemente i 25 MPa prefissati come obiettivo iniziale ed inoltre, ha presentato il maggior valore in assoluto, tra tutte le miscele prodotte, dell'energia di frattura; è stata difatti ottenuta una miscela con una buona stabilità, caratterizzata da un sistema dei vuoti costituito da bolle di piccole dimensioni e, con una distribuzione omogenea delle bolle, in termini di dimensioni e forma delle bolle; questo ha portato ad ottenere un incremento della resistenza a compressione e a flessione ed un notevole incremento dell'energia di frattura, in quanto, il sistema di bolle così caratterizzato, permette di generare una superficie di frattura più tortuosa e, quindi, un materiale che riesce a dissipare una notevole energia. L'utilizzo di sabbia fine con diametro massimo pari a 0,5 mm ha portato invece ad un peggioramento delle proprietà meccaniche: infatti, nel caso della miscela M2CBD05 O AC045, si è ottenuto il più basso valore di resistenza a flessione, tra tutte le miscele con una densità target pari a 1450 kg/m<sup>3</sup>. Sono inoltre interessanti i risultati ottenuti riducendo il quantitativo di aggregato (sabbia) rispetto al cemento: entrambe le miscele realizzate, hanno raggiunto una resistenza a compressione pari circa a 20 MPa, con valori di densità pari a 1300 e 1400 kg/m<sup>3</sup>; inoltre, tale riduzione, ha portato anche ad un peggioramento delle capacità flessionali, questo per via del minor effetto di ingranamento che si ha nel caso dei campioni caratterizzati da una minore quantità della sabbia nell'unità di volume.

La miscela di calcestruzzo schiumato M2CBD025\_OTT è stata quella utilizzata, per via delle migliori proprietà meccaniche rispetto quelle delle altre miscele, nel calcolo numerico per la valutazione della risposta sismica di strutture in calcestruzzo armato. In particolare, si è confrontata la risposta di strutture a tre, sei e nove piani realizzate con il calcestruzzo alleggerito sviluppato nella presente tesi, con la risposta delle stesse strutture realizzate con un calcestruzzo ordinario di pari resistenza. Dai risultati ottenuti dall'analisi modale si è riscontrato che l'utilizzo del calcestruzzo schiumato ha portato ad una riduzione della massa e della rigidezza globale della struttura che si traduce in un incremento del periodo e, di conseguenza, in una diminuzione delle sollecitazioni.

L'utilizzo di un calcestruzzo schiumato al posto di un calcestruzzo tradizionale andrebbe, per via dei ridotti valori delle sollecitazioni, a comportare un risparmio anche sulle armature necessarie. Si sono inoltre riscontrati maggiori valori degli spostamenti però risultati sempre entro i limiti previsti dalla normativa.

# Bibliografia

- [1] V. Afroughsabet, L. Biolzi e T. Ozbakkaloglu, «High-performance fiberreinforced concrete: a review,» 2016.
- [2] I. Löfgren, Fibre-reinforced Concrete for Industrial Construction a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis. PhD Thesis, Chelmers University of Technology, 2005.
- [3] P.S. Song e S. Hwang, «Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete,» *Construction and Buildings materials*, vol. 18, pp. 669 - 673, 2004.
- [4] Fuat Köksal, Fatih Altun, İlhami Yiğit e Yuşa Şahin , «Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes,» *Construction and Buildings materials,* vol. 22, p. 1874–1880, 2008.
- [5] Afroughsabet, Vahid e Ozbakkaloglu, Togay, «Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers,» *Construction and Building Materials*, n. 94, p. 73–82, 2015.
- [6] Mugahed Amran e Lee Yeong Huei, «Design Efficiency, Characteristics, and Utilization of Reinforced Foamed Concrete,» *Crystal Engineering*, 2020.
- [7] Y.H. Mugahed Amran, Nima Farzadnia e A.A. Abang Ali, «Properties and applications of foamed concrete;,» *Construction and Building Materials*, vol. 101, p. 990–1005, 2015.
- [8] G. Valitutti, A. Tifi e A. Gentile, Le idee della chimica, Zanichelli, 2009.
- [9] M. Guidotti, «la teoria DLVO,» 2013. [Online]. Available: http://www.galenotech.org/teoriaDLVO.htm.
- [10] C. Marianecci, *Lezione del corso: Tecniche farmaceutiche università la Sapienza Roma*, Roma, 2020.
- [11] D.Falliano, L.Restuccia e E.Gugliandolo, «A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects,» *Construction and Building Materials*, 2021.
- [12] D. Myers, Surfaces, Interfaces and Colloids, 1999.
- [13] Martyn Roderick Jones, Kezban Ozlutas e Li Zheng, «Stability and instability of foamed concrete,» *Magazine of Concrete Research*, 2015.

- [14] E. K. Kunhanandan Nambiar e Ramamurthy K, «Fresh State Characteristics of Foam Concrete,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 111-117, 2008.
- [15] E.K. Kunhanandan Nambiar e K. Ramamurthy, «Influence of filler type on the properties of foam concrete,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, p. 475–480, 2006.
- [16] K.Ramamurthy, E.K.Kunhanandan Nambiar e G.Indu Siva, «A classification of studies on properties of foam concrete,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, pp. 388-396, 2009.
- [17] K.C. Brady, G.R. Watts e M.R. Jones, *Specification for foamed concrete*, TRL Limited, 2001.
- [18] E.P. Kearsley e P.J. Wainwright, «Porosity and permeability of foamed concrete,» *Cement and concrete research,* vol. 31, pp. 805-812, 2001.
- [19] M. Sahmaran, O. Kasap e I.O. Yaman, «Effects of mix composition and water–cement ratio on the,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 29, pp. 159 - 167, 2007.
- [20] Ameer A. Hilal, Nicholas Howard Thom e Andrew Robert Dawson, «On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives,» *Construction and Building Materials*, n. 85, p. 157–164, 2015.
- [21] A. M. M. R. Jones, «Preliminary views on the potential of foamed,» *Magazine of Concrete Research*, 2005.
- [22] Bo Zhou et al., «New type of lightweight high-strength foamed concrete blocks,» *Earth and Environmental Science*, 2020.
- [23] Cong Ma e Bing Chen, «Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement,» *Construction and Building Materials,* n. 137, pp. 160 168, 2017.
- [24] U. Johnson Alengaram, Baig Abdullah Al Muhit, Mohd Zamin bin Jumaat e Michael Liu Yong Jing, «A comparison of the thermal conductivity of oil palm shell foamed concrete with conventional materials,» *Materials and Design*, n. 51, pp. 522-529, 2013.
- [25] M. Amran, R. Fediuk, N. Vatin e L. Y. Huei, «Fibre-Reinforced Foamed Concretes: A Review,» 2020.
- [26] C. Bing, W. Zhen e L. Ning, «Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete,» JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING, vol. 24, pp. 113-118, 2012.
- [27] Japan Concrete Institute Standard, *Method of test for fracture energy of concrete by use of notched beam JCI-S-001-2003,* 2003.

- [28] M. Kozłowskia, M. Kadelab e A. Kukiełkab, «Fracture energy of foamed concrete based on three-point bending test on notched beams,» *Procedia Engineering*, n. 108, p. 349 – 354, 2015.
- [29] D. Falliano, D. De Domenico, A. Sciarrone, G. Ricciardi, L. Restuccia e J. Tulliani, «Fracture behavior of lightweight foamed concrete: The crucial role of curing conditions,» *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 103, 2019.
- [30] Aurelio Ghersi e Pietro Lenza, Edifici antisismici in cemento armato, Dario Flaccovio Editore, 2018.
- [31] L. Petrini, R. Pinho e G. M. Calvi, Criteri di Progettazione Antisismica degli Edifici.
- [32] MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, *DECRETO 17* gennaio 2018, NTC 2018.
- Y.H. M. Amran, R. Alyousef e H. Alabduljabbar, M.H., «Performance properties of structural fibred-foamed concrete,» *Results in Engineering*, n. 5, 2020.